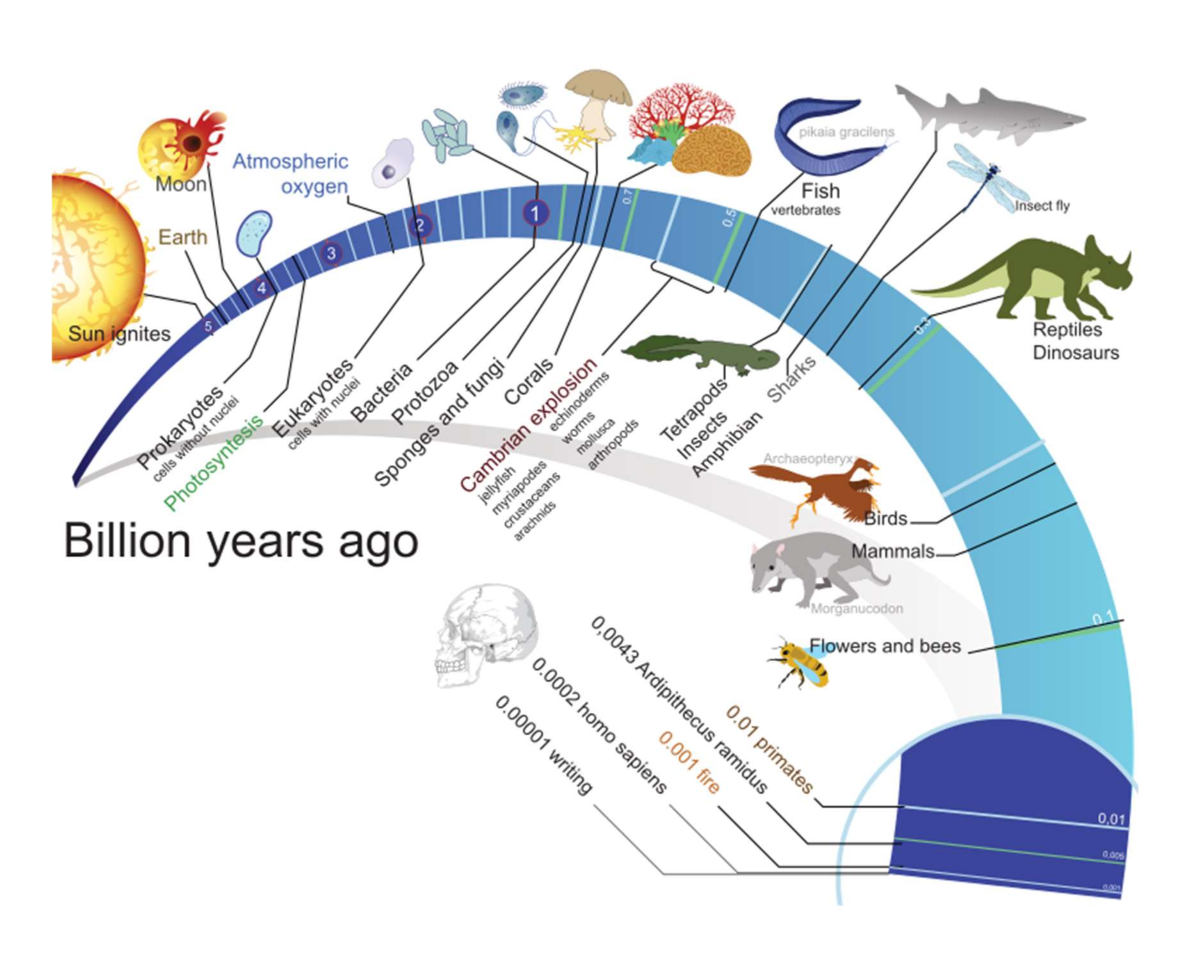
La biografía de la Vida
Una maravillosa aventura

Volumen II



Jaime Reguart Pelegrí

La biografía de la Vida

Una maravillosa aventura

Volumen II

Diciembre 2015

A partir de la serie “*La Biografía de la Vida*” editada en el blog El Cedazo.

(http://eltamiz.com/elcedazo/series/la-biografia-de-la-vida/)

Imagen de portada extraída de Wikimedia.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Timeline_evolution_of_life.svg?uselang=es

El único coste será el exclusivo de edición. El autor.

ÍNDICE

Volumen I

Volumen II

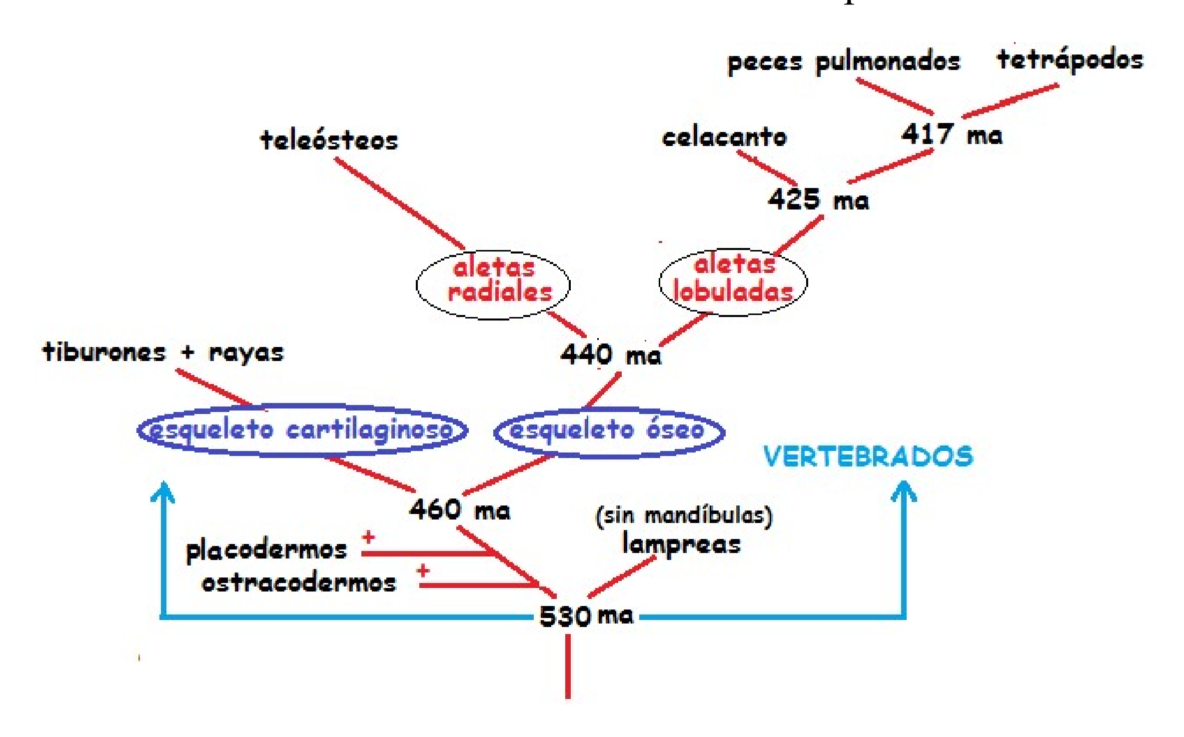
33. Los misterios de las cuatro extremidades

En este capítulo, tras haber desvelado en el anterior el inicio de la conquista de la tierra por los animales tetrápodos, vamos a intensificar nuestro foco en este hecho evolutivo y, principalmente, en el porqué de las cuatro aletas, patas, extremidades o como le queramos llamar. El hecho del evidente éxito de los animales tetrápodos resalta la importancia de cómo pudo aparecer evolutivamente su particular característica: el tener cuatro extremidades pareadas, dos anteriores y dos caudales, especializadas en el movimiento. En otros capítulos ya se explicó el desarrollo de ciertos órganos y sistemas importantes para la vida, como el sistema nervioso, el circulatorio, el ojo… y hoy lo complementamos con un relato acerca de la posible historia evolutiva de los cuatro miembros tetrápodos.

He titulado el capítulo de una forma que pretende incitar la curiosidad, aunque realmente debía haberlo hecho como: "*La nada novedosa genética que desarrolla los miembros de los tetrápodos*", ya que resulta significativo el hecho de que el entramado génico que dirige el desarrollo de las extremidades de los tetrápodos -su morfología, su orientación espacial, las articulaciones con manos y pies, e incluso los dedos y su orden- tiene una antigüedad que puede remontarse incluso a épocas anteriores a la definición de la bilateralidad en el reino Animalia.

Siempre se ha supuesto que los cuatro miembros de los tetrápodos, pareados dos a dos, se consiguieron un poco por una presión de tipo lamarckiano sobre el genoma de aquellos peces lobulados y pulmonados que decidieron salir a dar un paseo por tierra firme. Con cuatro aletas pareadas usadas como cuatro patas pudo conseguir

poblar el mundo terrestre. En el capítulo anterior se habla del individuo paradigma de este proceso: *Tiktaalik*, al que le llamamos "peztrápodo", el eslabón perdido entre peces y tetrápodos. Era el heredero de los peces pulmonados y lobulados, y también de aquellos que anteriormente habían desarrollado un esqueleto óseo, los osteictios, a partir del cartilaginoso de los aún más ancestrales condríctios. Conocemos todo esto también de capítulos anteriores.



Esquema de la filogenia de los animales craneados según Richard Dawkins (The ancestor's tale)

Lo consiguieron con las cuatro extremidades y algunas conquistas más, como su capacidad pulmonar que le permitía absorber para su metabolismo el abundante oxígeno atmosférico libre. Ya sabemos desde el capítulo 31 que el pulmón proviene de un saco especializado que surgió en la faringe de ciertos peces en un momento muy ancestral. Venía a sustituir en su función la que hasta entonces realizaban las branquias. Ya los artrópodos de hace 550 millones de años del Cámbrico disponían de ellas. O los hemicordados que vivieron poco después, como Myllokunmingia, pariente del ya familiar para nosotros *Haikouichthys* -ver el capítulo 19-, que disponía de hasta cinco o seis branquias. Estos órganos se

asientan sobre un elemento rígido que se conoce como arco branquial. Como se suele disponer de una serie de estas estructuras individuales, la configuración suele ser de una sucesión de opérculos y arcos con sus correspondientes branquias.

De otros capítulos sabemos también que los arcos branquiales y las branquias han sido los precursores evolutivos de especificidades anatómicas que hoy observamos en muchos animales, como lo son el cráneo, la mandíbula, el paladar, los huesos del oído o incluso la glándula tiroides.



*Arcos branquiales (arco blanquecino) soportando las branquias (rojas) en un lucio (*Wikimedia*, CC BY-SA 3.0)*

Y me diréis... ¿a qué viene esta literatura de la anatomía branquial? Y lo que es más curioso, ¿por qué la entrelazo con las extremidades de los tetrápodos? Pues porque sí tienen que ver. O al menos lo creemos así, como se ha podido comprobar al estudiar el mecanismo genético que define el pareado de extremidades, o el que fija el posicionamiento y orientación de estos miembros o de los dedos. E

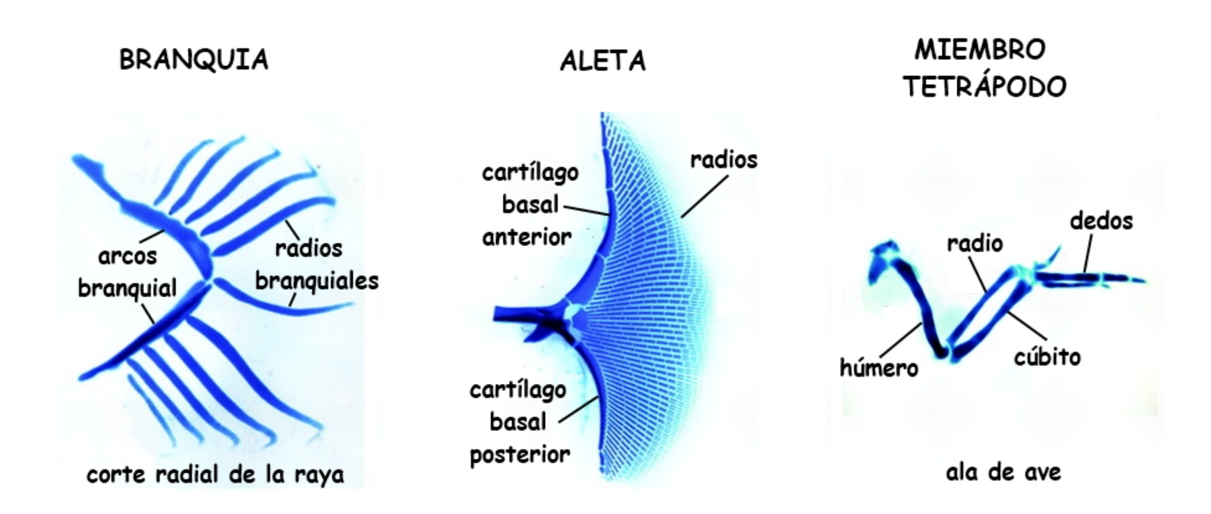
incluso de la regulación de la propia ontogenia de estos últimos,[1] o de los tobillos y muñecas.

Dentro del patrón corporal de la bilateralidad, característica morfológica de la que ya hablábamos en el capítulo 24, se ha logrado analizar [2] en los animales con mandíbula, los gnatostomados, los posibles orígenes genéticos de los miembros “pareados”. Proceso anatómico que podríamos considerar un paso evolutivo anterior al desarrollo adecuado de cada miembro. Desarrollo éste último en el que llegará a definirse cuál deberá ir a la derecha o a la izquierda, cuál en posición rostral o caudal, el lugar preciso para el dedo primero o el último, o su tamaño… Duplicar especularmente ciertos apéndices corporales ha tenido que ser una realidad anterior.

Este proceso de pareado parece que está inducido por la acción del ácido retinoico, un derivado de la vitamina A. En lo referente a los miembros de los tetrápodos, su gestación durante los primeros momentos del desarrollo general embrionario es gestionada por un circuito regulador en el que intervienen dos actores que se retroalimentan: el gen morfógeno Sonic hedgehog y el factor de crecimiento fibroblástico 8, Fgf8. El morfógeno actúa como el arquitecto de la construcción supervisando y decidiendo la morfología de la estructura que se va formando, mientras que un operario, el factor de crecimiento, va generando esta estructura con las instrucciones del gen. Éste, a su vez, recibe influencias del "operario" para redirigir las pautas de la construcción, básicamente en lo referente a la definición del eje antero-posterior o la longitud y forma del miembro.

Pero curiosamente este mismo circuito regulador es el que interviene en el desarrollo de las estructuras branquiales, como se ha podido observar al estudiar su desarrollo durante el crecimiento de los embriones de las rayas, unos curiosos animales del orden de los peces cartilaginosos. Además, se ha comprobado en el laboratorio que bajo la inducción del ácido retinoico es posible generar fuera del lugar anatómico normal un duplicado especular de partes de esa

estructura según el embrión va creciendo bajo las órdenes de la pareja Sonic hedge y Fgf8, de la misma manera que lo hace con los miembros de los tetrápodos o con las aletas de los peces.



*Comparación del crecimiento homólogo de apéndices en animales de diversos filos. El ciclo genético regulador de su desarrollo es idéntico en los tres casos (*Imagen*: modificada de J. Andrew Gillis, fair use)*

Esta correlación, apoyada en el hecho de que las branquias evolutivamente son anteriores a los miembros pareados -aletas o patas-, permite hacer la hipótesis de que bien pudiera ser que la red de señales duplicadoras inducidas por el ácido retinoico en el desarrollo de las branquias fuera también cronológicamente anterior a la aparición de los apéndices a pares en los vertebrados. Es decir, que cuando los miembros pareados surgieron ya en los peces, el mecanismo de duplicación que se usó para crear este particular patrón esquelético hacía tiempo que era operativo. Fue tomado prestado del de las branquias o quizás del patrón de desarrollo de una estructura faríngea aún más antigua, que genéticamente ya actuaba en un ancestro de los vertebrados deuteróstomos, la familia en donde se incluyen a animales mucho más antiguos que los "con mandíbula". Estaríamos hablando posiblemente de hace más de 650 millones de años.

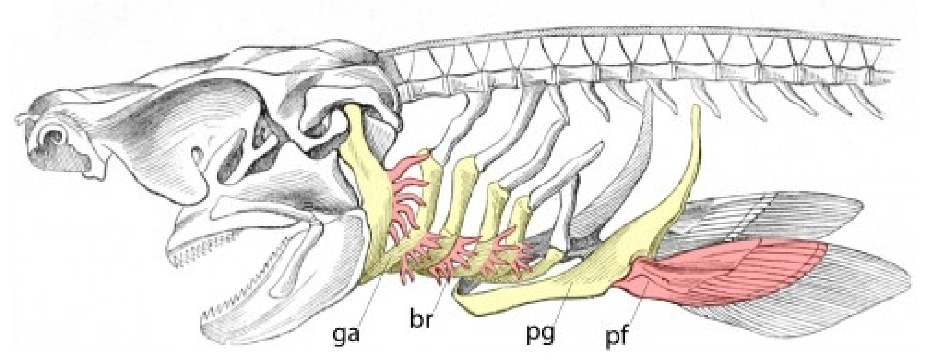
Creemos tener, por tanto, una posible explicación genética del porqué de los miembros pareados. Pero claro está, estos deben desarrollarse en el lugar preciso del organismo. Ya sabemos de otros capítulos que los genes Hox son los responsables de la metamerización de los organismos –la segmentación secuencial de los cuerpos según su eje longitudinal- y de la expresión de los particulares y precisos órganos que corresponden a cada uno de los metámeros. Un juego de proteínas, en cuanto a tipos y concentraciones, y de influencias intercelulares a lo largo del proceso de ontogenia define qué va en cada sitio determinado del organismo. Y de esta manera un par de miembros aparece en lo que será el lugar de las extremidades anteriores y un par de miembros diferentes en el sitio homólogo para las inferiores, cada miembro en su lugar adecuado. Los genes Hox actúan en diversos organismos multicelulares, que incluyen gran variedad de líneas filogenéticas animales, incluidos la mayoría de los tunicados ¿desde su posible aparición hace 565 millones de años? Incluso la maquinaria genética de los Hox es anterior, ya que se encuentran en los genomas de hongos y plantas. Por lo que podemos vislumbrar, su existencia y función está anclada en un tiempo muy profundo, antes de la divergencia de estos reinos. En los animales posiblemente inició su operativa hace más de mil millones de años.

Los Hox definen el lugar preciso donde aparecerán las cuatro aletas o las cuatro patas, pero a fin de cuentas su trabajo tiene que ser el resultado de un proceso evolutivo: ¿cuál es la historia de dos aletas delante y dos aletas detrás?

Volvamos al ejemplo de los condrictios. Tiburones y rayas protegen sus agallas con una especie de alerones de piel rigidizados mediante un armazón de radios cartilaginosos. Podemos verlo en la imagen anterior, donde se presenta un corte radial de la estructura branquial de una raya, a la izquierda. Nos damos cuenta de lo más curioso de estas estructuras cuando observamos su disposición anatómica en el esqueleto del animal. La imagen siguiente es un dibujo con la belleza de los croquis antiguos, extraído de la publicación [3] de 1866

“*Anatomy of Vertebrates I. Fishes and Reptile”* realizada por el dibujante naturalista Owen Staples. En el se representan de forma exquisita los cinco arcos branquiales (ga) soportes de los radios branquiales en rojo (br). Las branquias (que no aparecen el el dibujo) estarían unidas a los arcos y por detrás de los radios que son la estructura rigidizadora de los alerones que las protegen. Casi podemos considerar como el sexto arco branquial al cinturón pectoral -clavícula- (pg) en donde se soporta la aleta pectoral (pf) del tiburón.

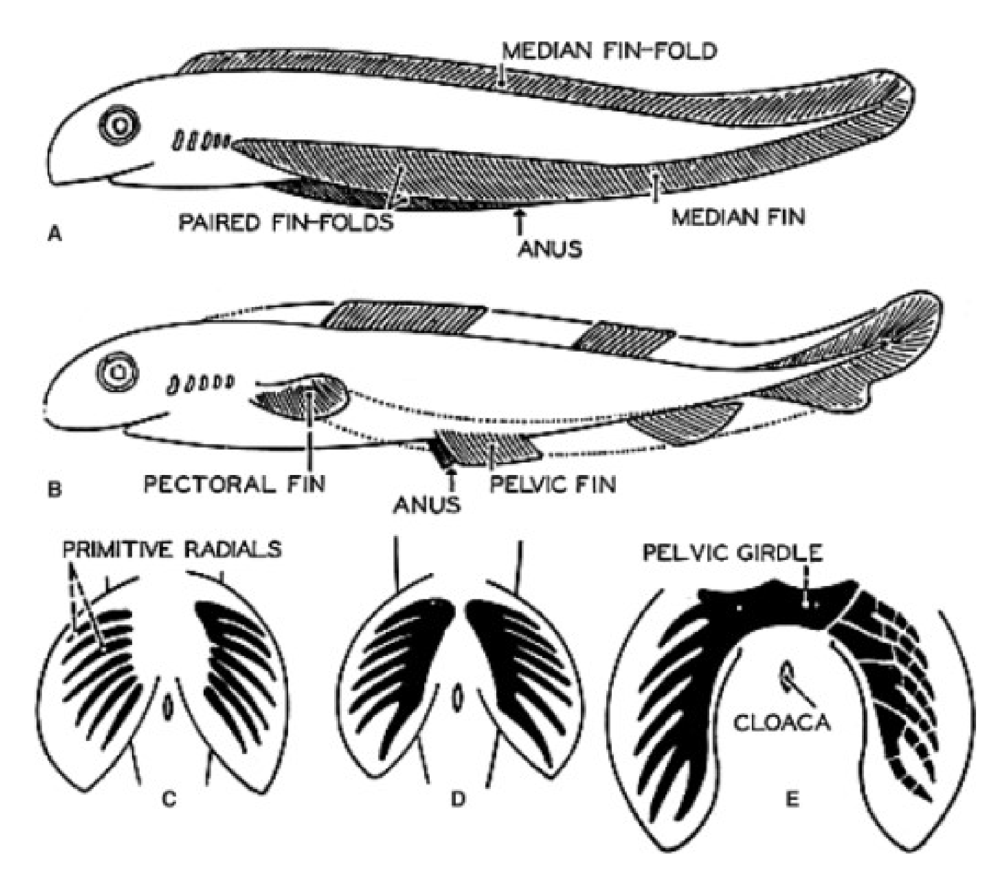




Las cinco aletas protectoras de las branquias en un tiburón blanco (Imagen: de la red*) y croquis de la parte anterior del esqueleto de un escualo (modificado de* Owen Staples*, uso público)*

Es tan evidente lo que sugiere tal disposición de cartílagos que ya en 1859 el anatomista alemán Karl Gegenbaur, en su libro “*Elementos de Anatomía Comparada*”, había postulado la homología que había

entre un arco branquial y las aletas o miembros de los vertebrados. Y que, por tanto, los últimos eran la etapa final del recorrido evolutivo del primero. Desgraciadamente no hay evidencias fósiles claras, eslabones definitivos que sustentan tal hipótesis. Además, sólo nos aclararía la realidad de un par de aletas anteriores, las pectorales, dejando al aire la realidad de las aletas pélvicas, en algunos peces muy alejadas de la zona branquial y soportadas por un hueso que podríamos calificar como "flotante" al estar embebido en la propia masa muscular del pez. Aunque tenemos una posible explicación.



*Hipótesis del pliegue muscular y dérmico (*Imagen*: Neal y Rand, 1939, uso público)*

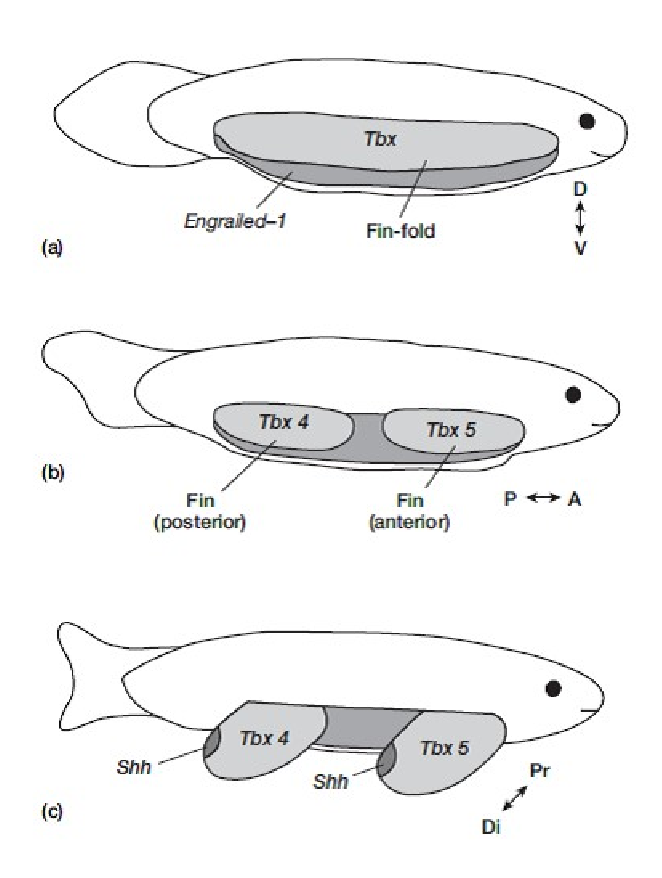
Casi a la par de que Gegenbaur plantera su alternativa branquial, los biólogos británicos F. M. Balfour y J, K. Thacher abogaban por otra explicación conocida como "*hipótesis del pliegue muscular y dérmico*".[4] De forma muy resumida, la idea surge al observar a los primeros vertebrados de esqueleto cartilaginoso, filogenéticamente

anteriores a los peces "con mandíbula", como el ya mencionado más arriba *Myllokunmingia*, de hace 530 millones de años. Disponía de agallas y de una membrana lateral pareada que discurría a lo largo del cuerpo. Más tarde, cien millones de años después, comenzaron a poblar los mares los acantodios, conocidos de otra manera como tiburones espinosos, que alargaron su existencia otros 200 millones de años. Se conocen acantodios con membranas longitudinales pareadas, como las de *Myllokunmingia*, y acantodios con aletas pareadas filogenéticamente más modernas. Algo había pasado entre una forma y otra, lo que constituye el corazón de la hipótesis de Balfour y Thacher: aletas pectorales y aletas pélvicas son la reminiscencia de las membranas pareadas que discurrían a lo largo del cuerpo del pez.

La imagen de la página anterior proviene también de un libro con solera: "*Chordate anatomy*" de los biólogos Herbert V. Neal y Herbert W. Rand, publicado en 1939.[5] Representa la hipotética evolución de las aletas pareadas y su soporte en el esqueleto. La parte superior y media representan el paso desde un par de membranas longitudinales a dos pectorales y dos pélvicas, donde estas últimas serían el estadio particular ya conseguido por los tiburones. En la parte inferior se representa el caso particular de cómo se pudo pasar evolutivamente desde unas primitivas aletas pélvicas separadas a unas aletas fijadas por un hueso de cadera.

Gracias a las actuales técnicas de análisis genéticos podemos acercarnos más a la realidad de la hipótesis anterior.[6] En la imagen de más abajo vemos que la gestión del desarrollo tanto de las membranas longitudinales como de las aletas pareadas recaen sobre un circuito regulador en el que intervienen hasta tres genes: Engrailed-1, T-box4/5 y nuestro conocido gen Sonic hedgehog. El primero podría participar en el desarrollo embrionario de la membrana longitudinal pareada, el segundo haría lo equivalente con los huesos basales de fijación de las aletas y, por fin, el tercero lo

que haría es inducir el alargamiento de estos huesos basales que a la postre formarían las aletas fuera del cuerpo.



Genes que intervienen en el desarrollo de las aletas de los peces (imagen: Kenneth Kardong, "Vertebrates" 2011, fair use)

El más ancestral T-box4/5 no estaría relacionado con estas últimas tareas, tal como se observa en un pariente actual de los peces más primitivos, el anfioxo, que no tiene aletas pero sí la doble membrana longitudinal. El origen de las cuatro aletas pareadas se habría producido evolutivamente más tarde con la especialización de T-box4/5 para formar hueso y su posterior duplicación en T-box4 y T-box5, los cuales sí forman apéndices en puntos independientes del organismo. La larga aleta lateral longitudinal se reforzaría en estos cuatro puntos, mientras que la región ventral perdería su membrana.

Situado cada par de miembros en el lugar adecuado, el siguiente paso en el que parece lógico curiosear sería el que define el eje estructural

y el patrón de forma individual de cada uno de esos miembros. No vamos a dar muchas novedades acerca de este tema, que ya salió al hablar de los miembros pareados: hay un circuito regulador retroalimentado entre el gen Sonic hedgehog y el factor de crecimiento Fgf-8 que en los tetrápodos, durante los estadios más temprano de su desarrollo embrionario, determina el eje antero-posterior de cada miembro y, por tanto, en qué lado del organismo debe ir; como también lo hace con la identidad de cada dedo -pulgar o meñique- o definiendo su lugar preciso en manos o pies. El mismo circuito regulador genético que participa en el desarrollo de las estructuras branquiales de los peces condríctios.

Se han realizado multitud de esfuerzos y estudios,[7] de los que han salido abundantes y repetidas conclusiones, todas ellas reforzando la tesis de la homología entre diversos aspectos del desarrollo embrionario de animales evolutivamente antiguos, como los condrictios, y otros de desarrollo posterior, como los modernos tetrápodos.

Todo ello nos permite pensar más seriamente en la veracidad de la hipótesis de Gegenbaur: los miembros de los tetrápodos puede que hayan evolucionado mediante la transformación de los arcos branquiales de un ancestro de los vertebrados. La base genética y química del proceso es idéntica, a pesar de que tenemos que reconocer que aún nos falta la pieza clave que nos daría la certeza, que sería el encontrar en el registro fósil un animal que corroborara la hipótesis: unos apéndices transición entre los radios de las branquias y los miembros pareados. Ahí queda *Tiktaalik*.

Pero suena bien… no sería la primera vez que la evolución permite realizar diversas funciones usando la misma herramienta, lo que se conoce en biología como exaptación. Se habría aprovechado un mecanismo "diseñado" para poder respirar de forma que pudiera ser usado también para otra función tan distinta como es el desplazamiento. A mí la evolución me sigue asombrando.

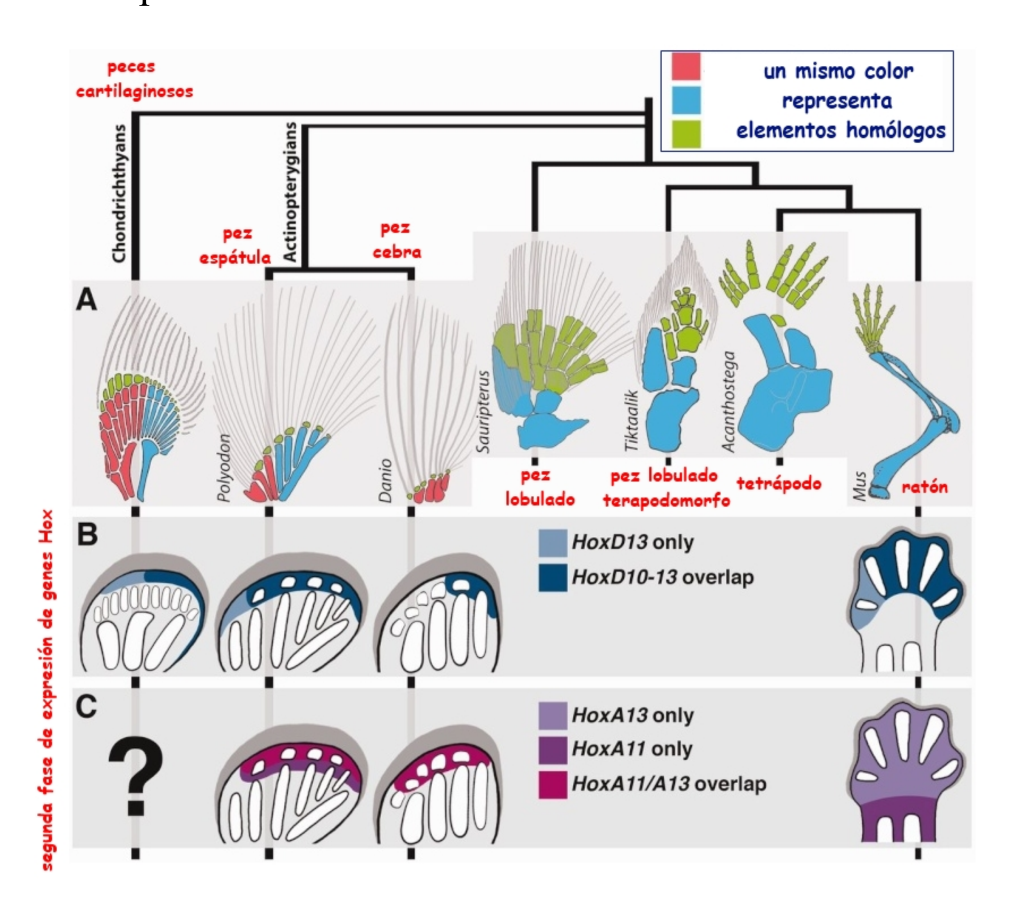
Tenemos ya, por tanto, una explicación para el fenómeno de parear los miembros durante el proceso ontológico de los bilaterales vertebrados. También, dentro de este esquema de apéndices pares, creemos tener una explicación para la aparición de sus miembros motores. Dos delanteros y dos traseros. Vamos a hablar ahora de cómo se pudo pasar a desarrollar en estos miembros unas **“subestructuras” óseas como son las muñecas o tobillos, las manos y pies o los dedos**.[8]

Sabemos que hace 365 millones de años algunos peces ya poseían los genes necesarios para el desarrollo de manos y pies, aunque no expresaran en ellos esta particularidad anatómica. Una vez más, al volver a épocas remotas nos encontramos procesos que hoy en día están aún operativos en formas de vida diferentes a las originales... ¿quién puede dudar de la evolución?

Nos tenemos que fijar en los peces condrósteos, que posiblemente proceden de primitivos peces cartilaginosos -los tatarabuelos de tiburones y rayas- y ya presentan una cierta osificación de sus esqueletos. Aunque hay biólogos que prefieren pensar que proceden, tras una regresión del proceso de osificación, de los peces óseos. El pez espátula, un individuo de la familia de los esturiones -famosos por sus huevas-, sería un representante actual de uno de ellos.

Estos peces, que proceden de un primitivo linaje que se remonta a hace 415 millones de años, no han cambiado mucho morfológica y genéticamente desde entonces, por lo que se hacen idóneos si se tiene el propósito de comparar y buscar distinciones y homologías entre sus aletas y los miembros de los tetrápodos. Esas aletas tienen una particularidad anatómica que las diferencia de los mucho más evolucionados peces con esqueleto óseo: una aleta ósea más elaborada y similar a las presentes en los vertebrados más primitivos, como tiburones y otras especies extintas de peces. De nuevo los condríctios. En la evolución el *déjà vu* parece permanente.

En la figura de la página siguiente podemos apreciar claramente la diferencia de la estructura ósea entre una aleta de un pez teleósteo, como es el pez cebra (Danio) -habitual personaje de los laboratorios- y una aleta de un pez condrósteo (Polyodon). En este último se aprecia una aleta ósea más elaborada, con más componentes que la del pez cebra. Aunque su extremo más basal puede resultar similar, la parte exterior tiene elementos nuevos de mayor longitud. Como ya hemos dicho, se asemeja más a la morfología presente en otras especies extintas de peces o en vertebrados actuales más primitivos, como pueden ser los tiburones.



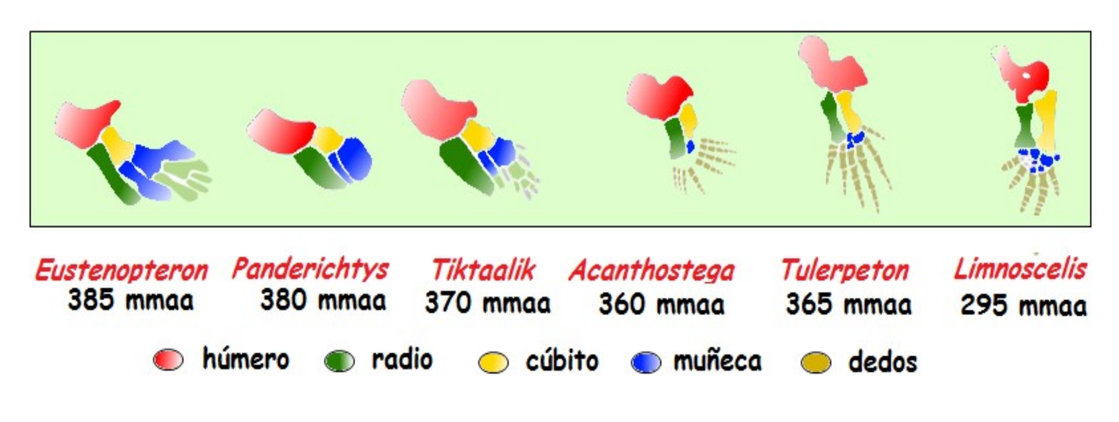
*Anatomía comparada de las aletas y patas (*Esquema*: Marcus C. Davis, fair use)*

Ya conocemos cómo durante el desarrollo embrionario de las aletas de los peces y de las extremidades de los tetrápodos intervienen los conocidos genes Hox. Cosa que hacen en dos etapas. La primera en el tiempo conforma la aleta simple, del tipo de la del pez cebra, o las

patas sin extremidades de los tetrápodos. A esta fase funcional de los Hox se la considera el patrón más primitivo de expresión de estos genes en los más primitivos vertebrados, como lo es el pez cebra. No obstante, en los vertebrados tetrápodos se produce una segunda fase de expresión de los Hox, que ocurre con posterioridad en el desarrollo embrionario, en la que se gestan las manos y los pies.

La teoría aceptada en la comunidad científica mantiene que el patrón de la expresión del gen Hox visto en el pez cebra representa, en el caso de sus aletas, el estado más primitivo de cualquier vertebrado, y que el grupo de los tetrápodos añadió sobre este elaborado sistema una segunda fase que alteraba el patrón esquelético de la aleta para producir las manos y pies.

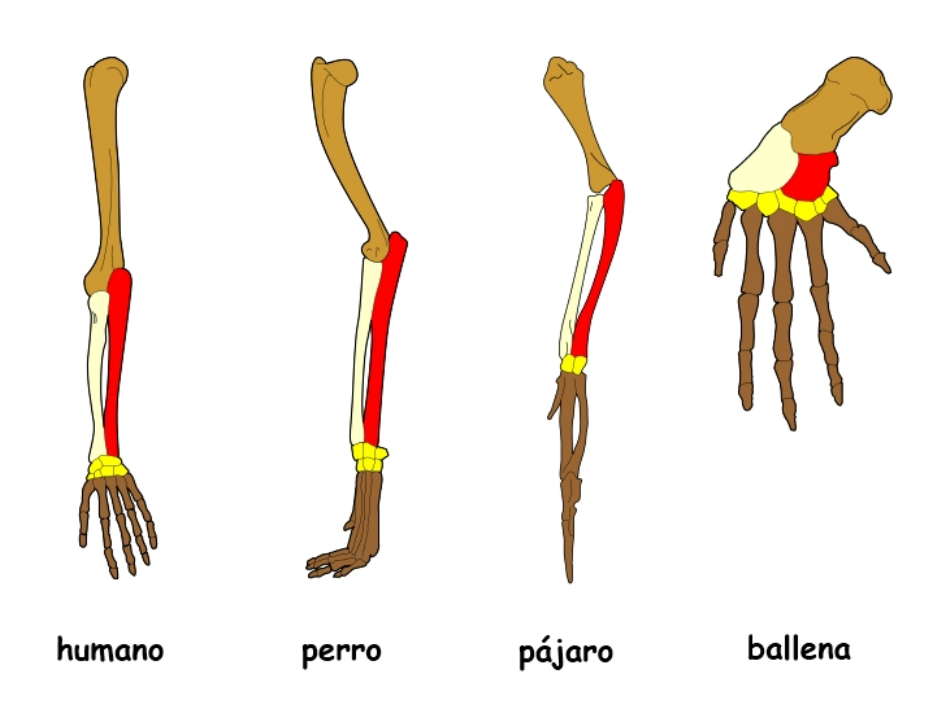
Dado que la aleta del pez espátula parece un estadio intermedio entre la del pez cebra y la de un tetrápodo primitivo, como el *Tiltaalik roseae*, parecía lógico que las tres fases estuvieran encadenadas en un proceso secuencial evolutivo. Se ha observado que a pesar de que la segunda fase de expresión de los Hox en el pez cebra no produce elementos adicionales, en el pez espátula se activa para completar su morfología aunque no tenga dedos, lo que revela que el patrón de actividad genética que se creía único en los vertebrados con manos y pies es, de hecho, mucho más general y primitivo, y que existía mucho antes de que hace 370 millones de años Tiktaalik empezara a abandonar el agua y a caminar sobre el suelo.



De peces a reptiles, pasando por Tiltaalik

A la vista de lo anterior esta claro que la capacidad de construir miembros con dedos existió durante mucho tiempo. Pero se necesitó un conjunto de cambios ambientales y ecológicos para que el patrón de genes que expresan las manos y los pies, y los dedos, pudiera asumir esta funcionalidad a pesar de que no era la suya original.

Demos, entonces, el último paso. Después de aparecer dos pares de extremidades, de posicionarse correctamente respecto del cuerpo, de adoptar cada una de ellas una eficaz morfología y de complementarse con una segunda fase de desarrollo en la que aparecen manos, pies, muñecas, tobillos y dedos, también eficientemente posicionados, ya sólo queda en el camino evolutivo el dejar a la heterocronía que trabaje imponiendo unos cambios de ritmo en los procesos de desarrollo corporal, desde la fase embrionaria a la adulta, que den lugar, dentro del mismo diseño, a la variabilidad que se observa en la forma y el tamaño de los organismos. Genética, epigenética y selección son sus responsables.



La misma estructura, los mismos componentes pero distintas formas. La heterocronía en funcionamiento.

La realidad de la heterocronía nos ha llevado por variados caminos evolutivos, todos ellos útiles y eficientes. Hablando de las extremidades de los tetrápodos, desde las alas de las aves a las palas zapadoras de los topos; de la ballesta del guepardo a la aleta del delfín; de la pezuña simple perisodáctila a la doble artiodáctila. De la robustez de una pata de elefante a la liviandad de la de un petirrojo, de la desproporción por corta en un perro salchicha a la desproporción por larga en la jirafa.

Con eso damos por finalizado este breve relato de la evolución de las patas de los vertebrados. El rastro fósil nos ha dado unas pistas, ya que la progresión que se observa es clara entre las aletas de un pez, las extremidades del eslabón intermedio que representa *Tiltaalik* y los miembros de los vertebrados tetrápodos.

La genética nos ha permitido enfocar aún más ciertos procesos en donde hay un vacío del registro de fósiles… y nos ha llevado a procedimientos ancestrales que ya existían y operaban, alguno de ellos, posiblemente hace más de mil millones de años. Procedimientos que se han recuperado para la expresión de la morfología anatómica de estos magníficos adminículos que nos permiten desplazarnos y, al final de la línea evolutiva de complejidad funcional, manejar herramientas.

NOTAS DEL CAPÍTULO 33:

1. La **ontogenia** describe el desarrollo de un organismo, desde la fecundación de un cigoto durante reproducción sexual hasta su senescencia, pasando por la forma adulta.
2. Para más información acudid a ésta publicación, "*Shared developmental mechanisms pattern the vertebrate gill arch and paired fin skeletons*", J. Andrew Gillis, de la revista PNAS de abril de 2009.

3. Libro de Richard Owen que podréis disfrutar en el siguiente enlace

[http://www.biodiversitylibrary.org/item/16520#page/7/mode/1up]

4. En éste enlace

[http://webdelprofesor.ula.ve/ciencias/mariana/spanish/documentos/T_Pliegue_Aleta_Kardong.pdf]

podéis encontrar una breve reseña sobre la mencionada hipótesis del pliegue muscular y dérmico.

5. En este enlace podéis disfrutar de ésa joya de Herbert V. Neal y Herbert W. Rand.

[http://www.biodiversitylibrary.org/item/28773#page/9/mode/1up]

6. "*Tbx4/5 gene duplication and the origin of vertebrate paired appendages*", Carolina Minguillón et al. Para mayor información acudid a ésta publicación de PNAS de diciembre de 2009.

7. Añadimos por su actualidad este artículo, "*Gills, fins and the evolution of vertebrate paired appendages*", Andrew Gillis de 2016, o este otro, "*The evolutionarily conserved transcription factor Sp1 controls appendage growth through Notch signaling*", Sergio Córdoba et al., publicados en 2016.

8. Según lo expuesto en esta publicación, "*The Deep Homology of the Autopod: Insights from Hox Gene Regulation*", Marcus C. Davis, de la revista Integrativa & Comparative Biology de agosto de 2013.

34. Entramos en el Carbonífero

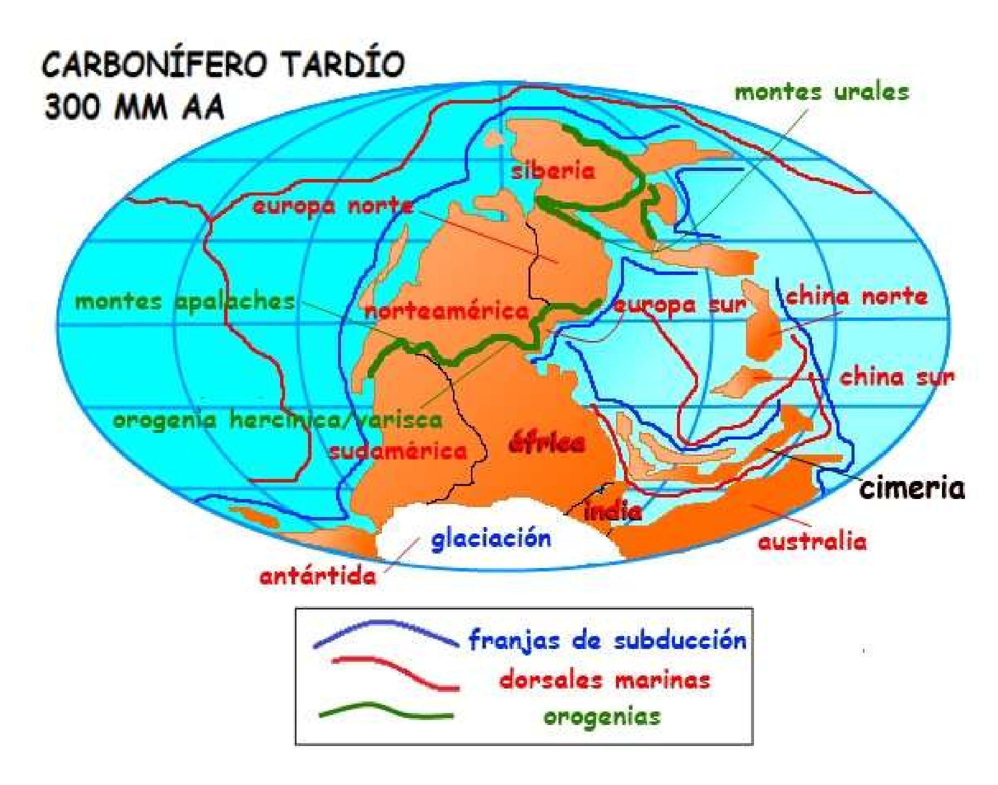
En el capítulo anterior presenciamos los esfuerzos de los peces pulmonados por asomar las narices fuera del agua en su afán de aprovechar las oportunidades que presentían existían en el nuevo entorno. Eso sucedía hace unos 380 millones de años. En este capítulo y los dos siguientes vamos a realizar un paseo que nos va a llevar hasta el momento en que consiguen el éxito, cuando anfibios y reptiles prosperarán definitivamente en tierra firme. Lo primero que precisamos es contextualizar los acontecimientos y, como hemos hecho al analizar otros periodos, empezamos con el escenario: la geología, el medio ambiente climático y la biosfera vegetal.



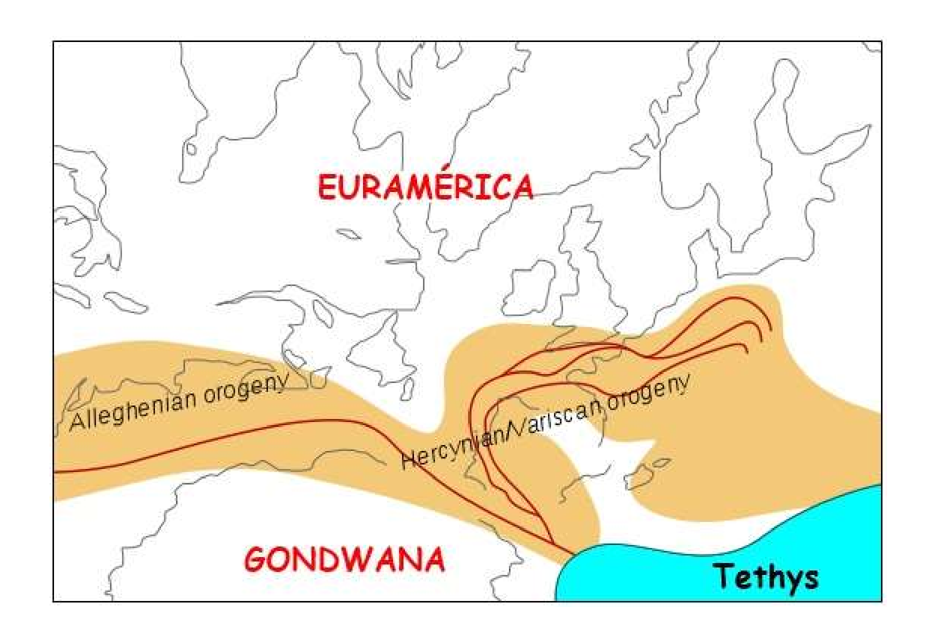
Damos, pues, un paso cronológico más para adentrarnos en el siguiente periodo, conocido como Carbonífero, que se extendió a lo largo de 60 millones de años, desde 359 hasta 299 millones antes de hoy.

Su nombre tiene raíces del latín y significa "*llevar carbón*" como reflejo de los grandes depósitos de procedencia vegetal de este mineral que se generaron en esta época. La abundancia de la

vegetación provocó el incremento del oxígeno atmosférico, que llegó a los niveles históricos más altos conocidos. Aparecieron las coníferas mientras los insectos inventaban el vuelo a la vez que los reptiles asomaron la nariz con su huevo amniótico.



El mapa anterior corresponde al periodo más tardío del Carbonífero, cuando estaba a punto de consolidarse Pangea. Recordemos que salíamos del Devónico con el gran continente Gondwana en posición austral, acabando el último periodo glaciar que había cubierto con un sólido manto gélido su polo sur. Por encima de él, dos continentes, Siberia y Euramérica, en posiciones ecuatotropicales. La deriva de estas tres masas de tierra los iba aproximando entre sí, creando unas franjas de colisión que desarrollaron fuertes orogenias. De la unión entre Siberia y Euramérica se creó el continente Laurasia y aparecieron los montes Urales, entre otros. Y al sur, en la zona de subducción entre Euramérica y Gondwana, se desarrollaron las orogenias Hercínica/Varisca en Europa y la Alegeniana en Norteamérica. La primera produjo, entre otros, una serie de importantes afloramientos de granitos en la península Ibérica, formando las cordilleras centrales y el macizo gallego.

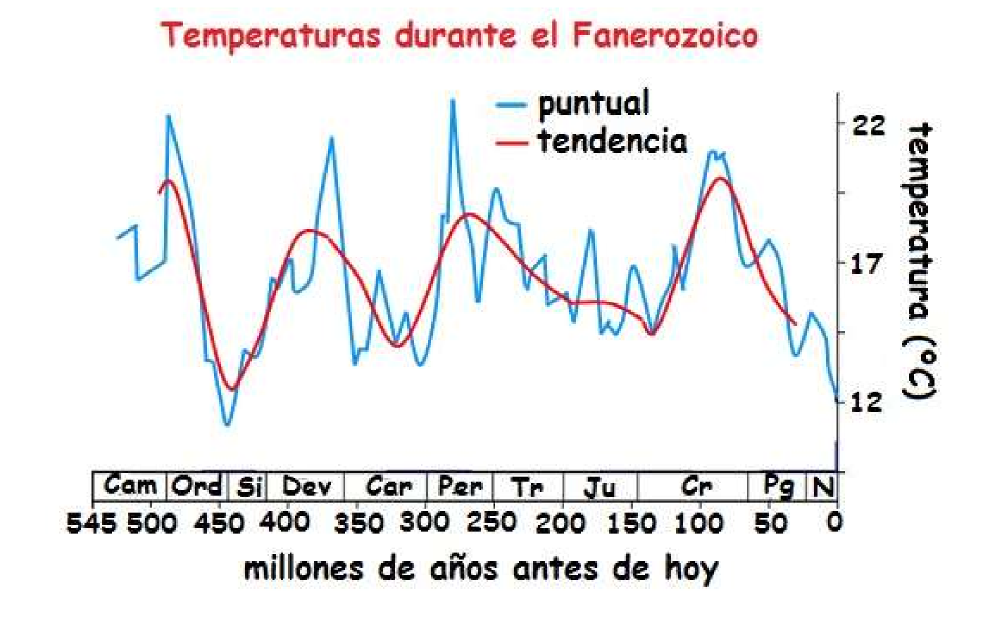


Orogenias Alegeniana y Hercínica/Varisca. Dibujados con traza gris los perfiles de los actuales continentes (Wikimedia, CC BY-SA 1.0)

La Alegeniana añadió una cola suroeste a los montes Apalaches americanos que habían surgido en el Ordovícico en la unión de Avalonia, Báltica y Laurentia -en la figura anterior podemos seguir su amplia incidencia-. Por oriente quedaban descolgados, cerrando el mar de Tethys, dos pequeños cratones que conformarían más tarde China, norte y sur.

La primera parte del periodo fue en gran medida cálida, aunque progresivamente se fue implantando un enfriamiento que desembocó en una fuerte y duradera glaciación sobre el polo sur de Gondwana, provocado por el giro de este continente hacia occidente que le había situado en posición austral. Esta circunstancia provocó una disminución del nivel del mar, y por tanto una menor superficie oceánica. Una mayor superficie de las tierras al irse retirando las aguas, así como una mayor extensión de los hielos, iba a favor de incrementar el albedo del planeta.[1] Ello se tradujo a la larga en un enfriamiento de la atmósfera y una climatología más seca, provocando en las zonas intermedias una situación de menor humedad y mayor aridez. A pesar de ello, a finales del Carbonífero

aún se mantenía un cierto clima cálido y húmedo en reducidas zonas ecuatoriales.



(A partir de datos del libro "The Resilient Earth: Unprecedented Climate Change?", Allen Simmons y Doug L. Hoffman,[2] fair use)

Además, a la disminución del nivel de los océanos se le unieron los movimientos continentales que iban cerrando espacios, lo cual iba produciendo un lento pero progresivo incremento de las zonas de aguas poco profundas que se hacía más palpable en las cada vez más estrechas zonas intercontinentales. Al mismo tiempo, este lento descenso del nivel del mar generaba también unas grandes extensiones de planicies costeras y la aparición de tierras llanas con escaso drenaje.

Así que el mantenimiento de las buenas condiciones climáticas que estaban dando una tregua en el trópico, unido a la gran extensión de hábitats favorables, propulsaron el desarrollo de grandes bosques en estas zonas, así como de su fauna marina. La bonanza de las poblaciones de estos animales se expresó en la aparición de inmensos sedimentos de calizas sobre Norteamérica y Europa, resultado del precipitado y acumulación de conchas y cuerpos de animales marinos muertos.

Las grandes plantas vasculares leñosas habían empezado a crecer de tamaño y a extenderse sobre los continentes hace unos 375 millones de años antes de hoy. El auge de estas plantas impulsó una sobreabundancia de materia orgánica que al morir quedaba enterrada en los limos de las ciénagas y que posteriormente era arrastrada en parte por las aguas de los ríos hasta el mar. De esta forma, otra gran cantidad de carbono orgánico se iba añadiendo al secuestrado por los esqueletos de los animales marinos.

Pero esto no fue la influencia más significativa de la biota vegetal durante el Carbonífero. En aquel momento la captura del carbono se veía magnificada por otros motivos. La exuberancia de la vegetación en las ubicuas zonas pantanosas originaba un exceso de materia orgánica en las aguas, lo que a su vez producía unas condiciones de anoxia que ralentizaba la descomposición de los detritos vegetales.

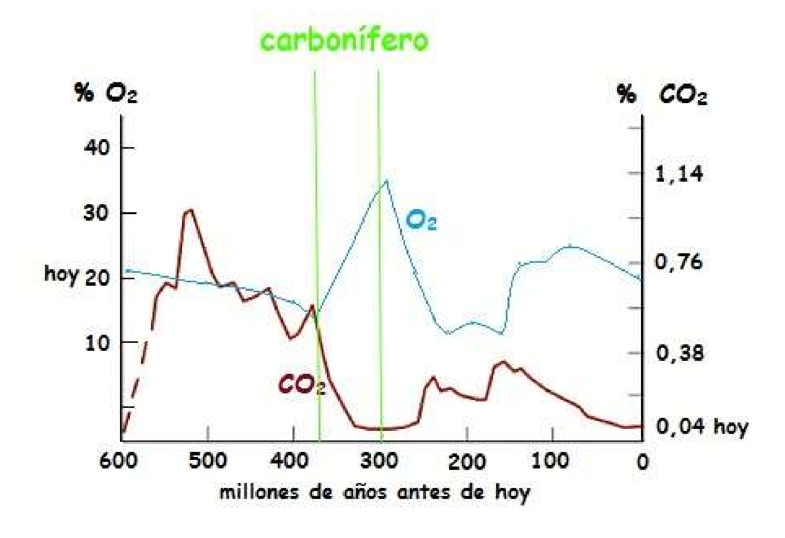
A ello se añadía el hecho de que las plantas leñosas estaban constituidas en gran medida por lignina, un polímero que a los microorganismos tipo hongo, incluso a día de hoy, les resultaba difícil de descomponer, y más en una época en que todavía no habrían perfeccionado esta habilidad.

Estas circunstancias hacían que el enterramiento de los despojos de las plantas no fuera seguido por una descomposición posterior, lo que conllevó a que con el paso de los años los restos orgánicos se convirtieran en carbón. La cantidad originada durante este periodo es la de mayor abundancia en toda la historia de la Tierra.

El gran florecimiento de plantas y bosques fue acompañado lógicamente por un incremento de los efectos de su función clorofílica, que se concretaba en una mayor absorción de CO_2 y una gran producción de O_2 que tuvo consecuencias en la composición de la atmósfera, en donde se redujo la participación del primer gas en paralelo a un incremento de la del oxígeno. La disminución del CO_2 se veía reforzada por las nuevas condiciones químico-orgánicas de las aguas comentadas en el párrafo anterior, que dificultaban la

descomposición de la materia orgánica y favorecían el secuestro del carbono en el subsuelo.

Fuera por la causa que fuera, lo cierto es que se estima que el porcentaje de oxígeno en la atmósfera llegó hasta el 35%. Hay teorías que afirman que el nivel de O_2 no pudo crecer más de este 35% máximo que indica la gráfica siguiente, ya que a partir de este porcentaje los incendios forestales se hubieran descontrolado, realimentando un efecto freno sobre los valores absolutos de la función fotosintética al disminuir la masa vegetal.



Una de las consecuencias del alto porcentaje atmosférico del oxígeno fue que pudo afectar al metabolismo y a la evolución de las plantas y animales. Algunos estudios sugieren que hechos como el gigantismo de los insectos, o los cambios en los organismos marinos con sistemas respiratorios por difusión de gases, o el reforzamiento de la colonización de la tierra por los vertebrados a lo largo del fin del Paleozoico, hace entre 350 y 260 millones de años, fueron favorecidos en gran medida por las elevadas concentraciones de O_2 en aquella época. Suena plausible, ya que en el capítulo 07 que titulamos "*Rudimentos de gestión energética*", aprendimos que cuando el oxígeno se constituyó como novedoso último receptor de electrones en las mitocondrias celulares, el metabolismo llegó a la máxima eficacia en el aprovechamiento energético. Como veremos en el siguiente capítulo dedicado a los insectos, el gigantismo pudo

ser el resultado de la coevolución que podríamos titular como "más oxígeno-mejores fenotipos".

La biota del Carbonífero

Después de presentar los aspectos generales del escenario del Carbonífero estamos ya preparados para ampliar el zoom sobre los diversos biotopos. Comencemos por los mares.

En líneas generales el **paisaje marino** no se diferenciaría mucho del que observábamos durante el Devónico. Los corales continuaban colaborando con esponjas y algas para seguir formando grandes masas de arrecifes calcáreos. Posiblemente el buen clima, las altas temperaturas de las aguas y el aún elevado porcentaje de CO_2 de inicios del periodo favorecieron el aprovechamiento de la oportunidad que suponía para los animales el uso del carbonato cálcico como protección. Los que habían adquirido esta habilidad prosperaron en los mares del Carbonífero. No sólo los corales, sino también las algas calcáreas, los braquiópodos gigantes con sus dos valvas de cabeza, los briozoos con su tubo protector por cuyo extremo agitaban unos tentaculillos para capturar alimento, y los crinoideos, cuyos esqueletos calcáreos se encuentran entre los fósiles más abundantes, puesto que formaban extensas praderas submarinas en las someras aguas que aparecían entre los continentes durante el proceso de su unión. Estos últimos animales, conjuntamente con los foraminíferos y sus esqueletos internos porosos, contribuyeron con una inmensa masa de material en la formación de calizas.

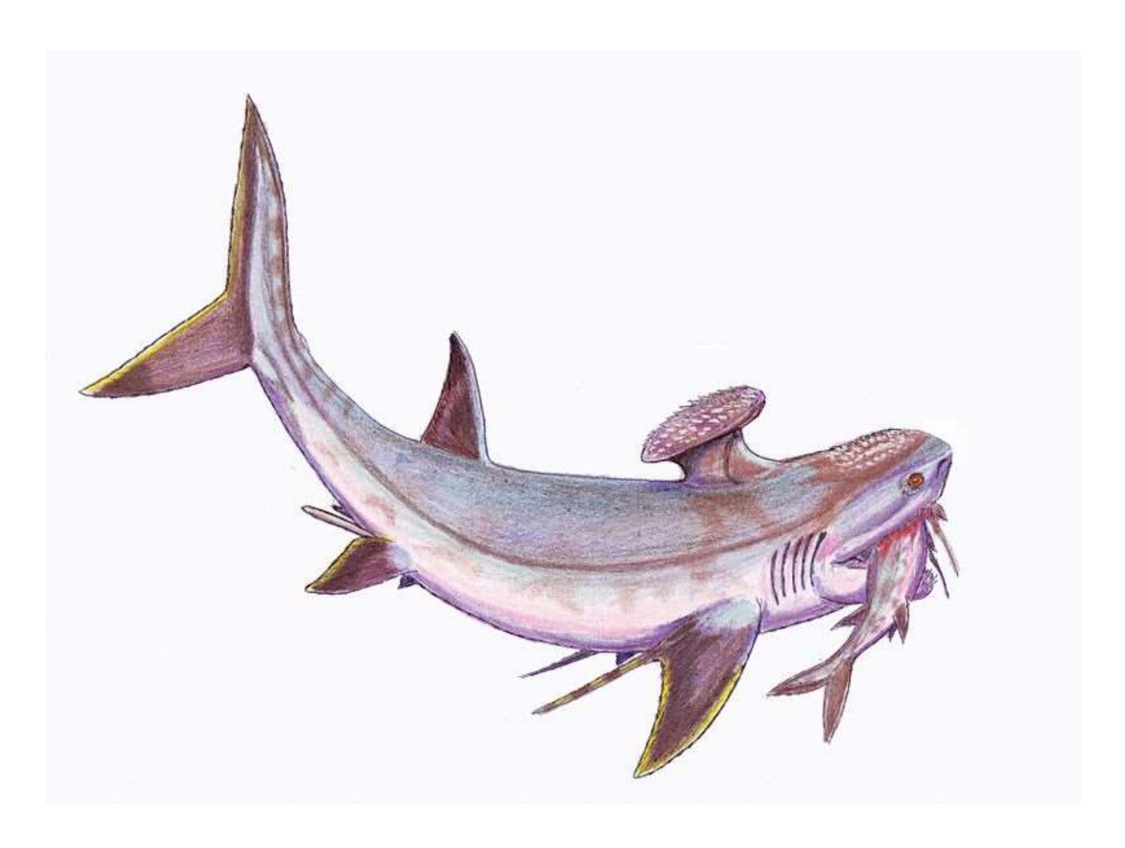
Podemos observar estas inmensas capas de calizas, por ejemplo, en la cordillera norteña de España. Ya comentamos que en este periodo la orogenia Herciniana/Varisca formó, entre otros, los montes gallegos. Junto a estos se habrían depositado las capas sedimentarias de calizas en el Carbonífero. Unos trescientos millones de años después se produciría una nueva orogenia de la que ya hablaremos

en su momento, la Alpina, que elevó estas calizas formándose los Picos de Europa.



Responsables de las formaciones calizas del Carbonífero (Imágenes de Wikimedia, dominio público y CC BY-SA 2.5/3.0)

Entre los animales nadadores dominaron ya los amonites y los tiburones y sus parientes, que desplazaron a los cefalópodos ortoconos con su concha recta y a los peces ostracodermos, a los placodermos y a los falsos tiburones. Se supone que el gran éxito en la radiación de los tiburones en este periodo fue debido al declinar de los placodermos, que comenzó a finales del Devónico, lo cual dejó espacios libres que permitieron a los nuevos organismos desarrollarse ocupando estos nichos vacíos. Como resultado de su éxito evolutivo, los tiburones desarrollaron una gran variedad de formas extrañas, como el caso del *Stethacanthus,* que tenía en el dorso una aleta como una brocha con dientes que se supone sería usada en sus rituales de emparejamiento.



Representación artística del Stethacanthus (Wikimedia, GFDL 1.2)

Mientras todo esto sucedía en los mares, en tierra firme iban prosperando las **plantas**.

Realmente el Carbonífero marcó el triunfo de la vida vegetal sobre la Tierra más allá del éxito consolidado de las plantas acuáticas. Su evolución y variación estuvo muy condicionada por el clima. Apoyadas en las semillas que ya habían triunfado a finales del Devónico, en la franja ecuatorial y tropical, húmeda y cálida, desarrollaron una notable masa forestal en las tierras bajas de marismas próximas a las costas. En ellas abundaban las plantas que ya conocíamos del Devónico, como el enorme licopodio *Lepidodendron* o "*árbol de escamas*" por la forma de su tronco, de un tamaño próximo a los 40 metros, o las *Pteridospermas,* que se caracterizaban por tener hojas grandes parecidas a las de los helechos, pero portadoras de semillas verdaderas. También en la zona templada tropical encontramos plantas más modernas, como la gigantesca "*cola de caballo*" *Calamites* de 20 metros en altura.



Hojas fósiles de Lepidodendron y de Calamites (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

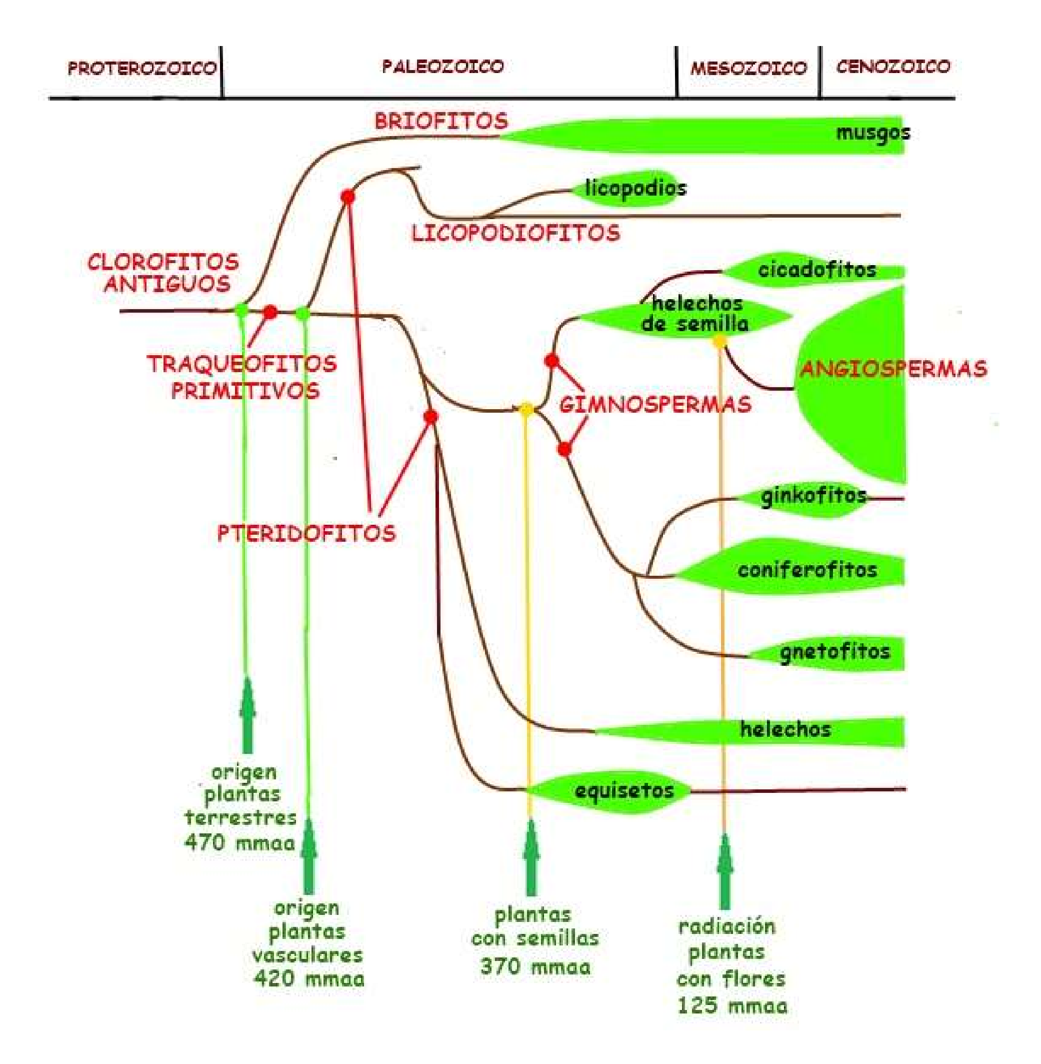
Conjuntamente con estas plantas de hoja ancha y modelo helecho, con semillas, empezaron a convivir las gimnospermas, también con semillas. Ejemplos muy conocidos por nosotros lo son las coníferas: pinos, abetos, cipreses…

Está ampliamente aceptado el hecho de que las gimnospermas se originaron a finales del Carbonífero, como resultado de un suceso de duplicación total de su genoma acaecido hace unos 319 millones de años. Sus semillas no se forman en un ovario cerrado que evoluciona hacia un fruto, como les pasará más tarde a las angiospermas, sino que aparecen desnudas y libres en las escamas de los conos. De ahí el nombre: del griego γυμνός, *desnudo*, y σπέρμα, *semilla*.



Cono y semilla de gimnosperma

Las **coníferas más tempranas** aparecieron en el Carbonífero tardío, pero con un aspecto diferente a las actuales. Sus antepasados fueron los *Cordaitales,* un tipo de gimnospermas con unas largas hojas con forma de cinta. Su tamaño era muy variado, entre el de un arbusto grande hasta el de un árbol pequeño. La mayoría estaban establecidos en los manglares, con suelos muy salobres, situación en la que la absorción de agua no se veía favorecida. Posiblemente por esto, al irse acostumbrando sus individuos a vivir con poca agua, se fueron aclimatando a ambientes más secos, y por tanto fueron los que prosperaron en aquella época.



Árbol evolutivo de las plantas (a partir del libro "Cinco reinos, guía ilustrada de los phyla de la vida en la Tierra", Margulis y Schwartz, 1985)

Las primeras coníferas verdaderas no dejaron fósiles en los depósitos de carbón. Con toda seguridad su adaptación a la sequía les había permitido colonizar latitudes más altas, fuera de las zonas tropicales en donde ya sabemos que se formaron los grandes yacimientos de tal mineral. Tenían ramas y hojas en forma de agujas, realmente impermeables, y se parecerían a la *Araucaria* moderna. Sus conos estaban peor organizados que las modernas piñas, lo que indicaría su conexión con los ya mencionados *Cordaitales.* A pesar del éxito que supuso su evolución, su radiación definitiva debió esperar a los huecos que dejó la masiva extinción de finales del Pérmico.

Por suerte podemos dejar volar una vez más nuestra imaginación apoyados en un reciente descubrimiento [3] cerca de Wuda, en China, zona muy rica en depósitos de carbón. Allí, hace casi 298 millones de años, en la frontera del Carbonífero con el Pérmico, cayeron en unos pocos días grandes cantidades de cenizas volcánicas que sepultaron un bosque pantanoso, conservando las plantas que lo formaban. Normalmente el suelo estaba recubierto por una capa de agua de varios centímetros que protegía de la oxidación a la abundante masa de residuos orgánicos que iban alimentando a la turbera. Durante las épocas de estiaje se generaba sobre el terreno una base de plantas herbáceas temporales, principalmente helechos y equisetos.

Durante el proceso de estudio del yacimiento, al retirar las cenizas aparecieron los troncos caídos justo en el lugar exacto en donde habían crecido. La mayoría correspondían a árboles pequeños de protoconíferas con hojas, troncos y piñas intactos. Se han hallado seis grupos de árboles diferentes, algunos de los cuales tenían unos 80 metros de alto. Los más abundantes son los helechos arborescentes que poblaban la parte inferior del bosque mientras que en las alturas dominaban el licopodio *Sigillaria* y los *Cordaitales*. Los investigadores han encontrado junto a los anteriores especímenes ejemplares de un árbol denominado *Noeggerathiales,* antepasado de las gimnospermas y con alguna característica que

vemos en las coníferas. A partir de estos descubrimientos se ha podido imaginar un fotograma, tal como vemos en la figura siguiente, que representa cómo debían ser aquellos bosques, en los que sobre un entorno de marismas dominaban los *Pteridospermas* con sus copas de hojas de helecho. Por encima asomaban las largas estructuras de los licopodios y con menor altura algunos *Cordaitales* antecesores de las coníferas.



Reconstrucción del bosque de Wuda (Fuente: Ren Yugao, ver nota 3 a pie de capítulo, PNAS, fair use)

Con la imagen en la cabeza podemos seguir imaginando una escena llena de vida:

"*La pegajosa humedad atrapada entre las raíces de los árboles de los manglares se había sobrecalentado bajo el sol inclemente de aquel paraje ecuatorial. El viento parecía un imposible en aquella*

densidad de tonalidades amarillo verdosas, reliquias de la batalla que la luz solar mantenía con el espeso dosel vegetal. El agua estancada y salobre, renovándose apenas con el movimiento de las mareas, parece que sólo pueda albergar formas muy sencillas y resistentes de vida, como las bacterias. Todo es una ilusión alejada de la realidad. Aguzando el oído se oiría un fondo sonoro de zumbidos, algún rápido chapoteo, el siseo de una hoja desplazada… la Vida estaba ahí. Insectos, anfibios e incluso algún pez lobulado en la entramada red de la subsistencia. En este momento sentimos la necesidad de echar una ojeada a estos protagonistas…"

…pero para ello tendremos que esperar al próximo capítulo, en el que nos deleitaremos con estos pequeños, o no tan pequeños por aquella época, bichejos que son los insectos. Para más tarde, en el siguiente, contemplar la más que trabajosa vida de los tetrápodos, anfibios y reptiles en su empeño de colonizar el hábitat terrestre.

NOTAS DEL CAPÍTULO 34:

1. El **albedo** es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras y las brillantes más que las mates. Esto se puede aplicar a la superficie terrestre en su relación con la energía del Sol que recibe.
2. Lo podéis ver en el capítulo 4 del libro "*The Resilient Earth: Unprecedented Climate Change?*", de donde se ha obtenido la información,
3. Reportado en este artículo, "*Permian vegetational Pompeii from Inner Mongolia and its implications for landscape paleoecology and paleobiogeography of Cathaysia*", Jun Wang et al., de la revista PNAS de marzo de 2012.

35. El Carbonífero nos incita a hablar de insectos

En el anterior capítulo nos habíamos paseado por el periodo Carbonífero, lo que nos permitió conocer su geología, climatología y flora. Hoy continuamos en él, época en la que tenemos constancia fehaciente de que **un animal inicia el vuelo por primera vez**, lo que nos incita a ampliar la visión del mundo de los insectos. Debo advertir que, una vez más en un mismo capítulo nos asomaremos a varios periodos geológicos, además del que le corresponde cronológicamente.

La primera mención a los insectos la hicimos en el capítulo 19, que titulamos "*Los filos del Cámbrico*", cuando anunciábamos cómo una de las ramas del árbol de los artrópodos iba a desembocar en esta clase del filo hexápodo. En el capítulo 29 dedicada al Silúrico empezábamos a desvelar el misterio al hablar de cómo un artrópodo de agua salada, un decápodo, se habituó hace unos 470 millones de años a un entorno de agua dulce al transformarse en un branquiópodo, para después dar el salto a la tierra seca inaugurando la saga de los hexápodos hace unos 420 millones de años. Con posterioridad, en el capítulo 31 que habíamos titulado *"El devónico: la edad de los peces"* comentábamos cómo en el yacimiento escocés de Rhynie Chert se encontraron fósiles de los primeros hexápodos terrestres conocidos, de inicios del período Devónico hace alrededor de 410 millones de años.

En este capítulo intentaremos hacer un breve repaso de su historia evolutiva.

El primer escalón en la diversificación de los hexápodos hacia los insectos se basa en la situación de las piezas bucales, si están en el

interior del cuerpo o en el exterior. Los insectos son de estos últimos. El siguiente elemento diferenciador, ya dentro de la clase Insecta, es la forma en que articulan las mandíbulas, si con una única rótula o con doble. De ahí pasamos a la aparición de las alas, con todas sus modalidades. Los insectos alados más ancestrales no podían doblar las alas sobre el abdomen. Con posterioridad la morfología de estos apéndices se hizo muy diversa, pudieron doblar las alas, las pudieron arrugar, perdieron un par, convirtieron el primer par en protección quitinosa del segundo… La penúltima conquista, aunque surgió casi a la par de la aparición de las alas, fue la metamorfosis con la que mediante la diversificación fenotípica conseguían los nichos más adecuados para cada etapa vital del insecto. La última y más tardía evolución fue más bien una conquista social que orgánica: algunos insectos, como las abejas o las termitas, se vuelven gregarios.

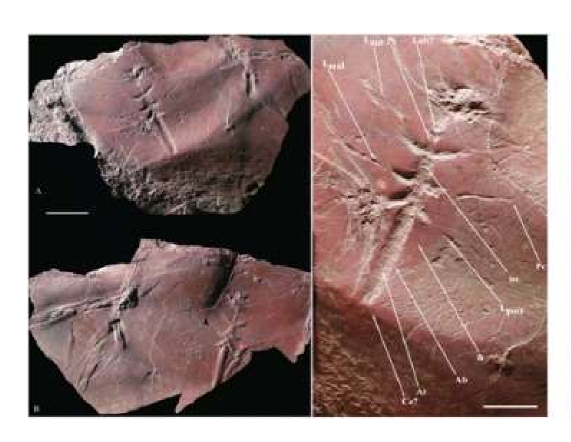
No todo sucedió en el Carbonífero, pero su historia a lo largo de este periodo es una buena excusa para profundizar en el camino de los insectos.



Los insectos del Silúrico debían ser muy sencillos y no habrían desarrollado aún alas. Pero ya en el **Carbonífero temprano aparecen con toda claridad evidencias de la existencia de estos apéndices.** Su desarrollo pudo ser incluso anterior, del Devónico, como se puede deducir del registro fósil del yacimiento de Rhynie Chert, en donde se han encontrado vestigios de insectos que tenían que tener alas.

En el año 2011 se publicó [1] el descubrimiento de unas huellas dejadas por un insecto del Carbonífero tardío, hace 310 millones de años. La traza fósil demuestra que su autor era un insecto volador y, probablemente, representante de la orden de los efemerópteros, más conocidos como moscas de mayo. La ausencia en estas trazas de

marcas de las alas y de la cabeza así como la clara manifestación de huellas en los alrededores, hace pensar que el insecto vino volando desde arriba adoptando en el suelo una posición con las alas y la cabeza sobre el suelo. Precisamente como lo hace una mosca de mayo.

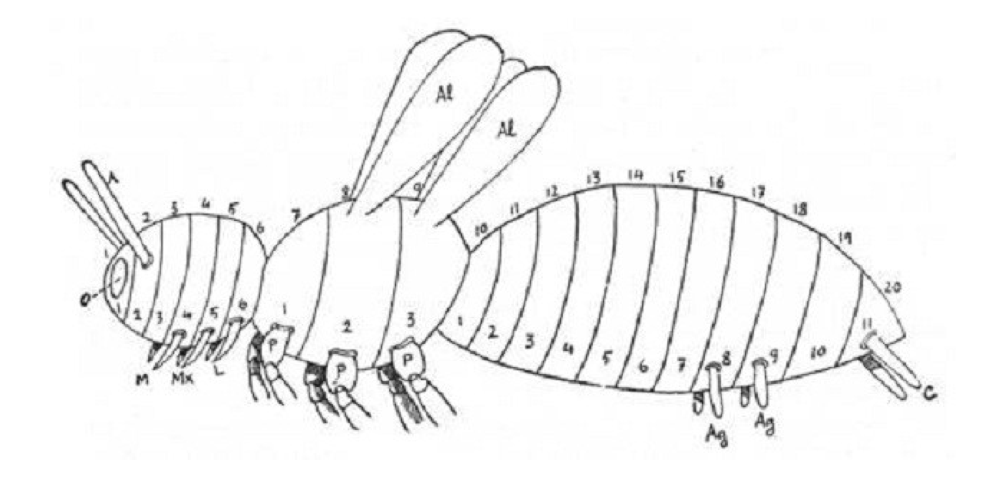



Trazas fósiles de un insecto volador del Carbonífero, que seguramente se corresponde con un individuo del orden de los efemerópteros (PNAS, fair use). Junto a las trazas una imagen actual del efemeróptero Ephemera dánica (Wikimedia, CC BY-SA 2.5 Generic)

Los insectos fueron los primeros animales en volar, unos 150 millones de años antes que los reptiles y 230 antes de que lo hicieran las aves. Y lo hicieron gracias posiblemente a una atmósfera diferente a la actual, con una mayor densidad y una mayor concentración de oxígeno. El desarrollo de las alas aportaba una gran ventaja: una mejora en la capacidad de huida en unos tiempos, los del Carbonífero, en que proliferaban los depredadores anfibios y artrópodos. Como con toda seguridad lo pudo ser algún tipo de miriápodo. Los primeros insectos alados tenían estos apéndices extendidos a lo largo del cuerpo, pero que no podían doblarse sobre éste como lo hacen la mayoría de los actuales. Este tipo de insectos dominaron este periodo y el siguiente, el Pérmico.

Para entender un poco mejor cómo aparecen las alas en estos animales vamos a fijarnos en cómo están estructurados sus

organismos. En todos los artrópodos, como sabemos ya por lo que dijimos en el capítulo 24, se da una segmentación corporal, una repetición de pautas corporales alineadas desde la cabeza a la cola. En particular, los insectos tienen seis segmentos que forman la cabeza, de los que del segundo “brotan” las antenas y de los dos siguientes todos los apéndices bucales. El tórax está conformado por tres segmentos que, al contrario de lo que pasa con los de la cabeza, se aprecian visualmente con facilidad. De cada uno de ellos nacen un par de patas, siendo los dos últimos los que normalmente desarrollan las alas. Los siguientes segmentos, en número variable según las especies, forman el abdomen.



Esquema de la segmentación de los insectos (ocwus.us.es, CC BY-NC-SA 2.5)

Existen varias hipótesis acerca de cómo evolucionaron las alas en los insectos. Hay consenso en que estos miembros y su mecanismo de control y propulsión aparecieron sobrepuestos a los apéndices de los segmentos primitivos, que en un principio estaban adaptados sólo para caminar: inicialmente patas y alas quedaron dispuestas unas junto a las otras en el organismo de los insectos, algo muy diferente a lo que sucedió con las alas de las aves, que evolucionaron mediante la transformación de una pata. Se cree que al principio las protuberancias que más tarde se volvieron alas les servirían a los insectos como balancines con los que equilibraban el cuerpo durante las caídas. Gracias a ellos lo harían de pie, lo que disminuiría el

riesgo de ser atrapados, al poder ocultarse con rapidez. Con posterioridad las aprovecharon para iniciar un tímido deslizamiento aerodinámico, pero de forma estática, sin que fueran capaces de moverlas. Esta habilidad debió ser el siguiente paso que se concretó a la par que el desarrollo de las articulaciones de su base, con lo que se aumentó el control y la capacidad y fuerza de empuje. También hay otras hipótesis que postulan que las alas se originaron a partir de una de las agallas, ya que estos apéndices presentan bastantes puntos en común con las alas, como puede ser la elevada densidad de venas o el poseer músculos y nervios.

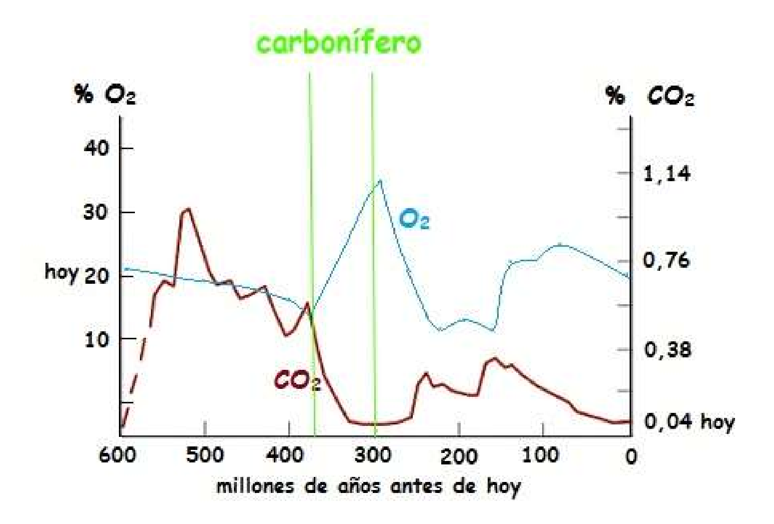


Imagen artística del hexápodo Palaeodictyoptera, carbonífero/pérmico, con una envergadura de alas de casi 20 centímetros (Imagen: Jon Augier, Museum Victoria, fair use)

En el Carbonífero medio existían ya numerosos insectos, perfectamente diferenciados en al menos once órdenes, entre los que destacan los muy parecidos *Palaeodictyoptera* (imagen anterior), *Diaphanopterodea* y *Megasecoptera,* que en algunos casos alcanzaron envergaduras de hasta 75 centímetros, y los *Ephemeroptera* que llegaron a alcanzar los 45 centímetros.

Puede parecer que todos los insectos y artrópodos del Carbonífero fueron muy grandes, como los milpiés de hasta dos metros, arañas

de más de cincuenta centímetros y libélulas con alas del tamaño de una gaviota. Pero fueron la excepción.



Hay una explicación para aquellos que crecieron de forma desmedida según los parámetros de los hombres de hoy. Los insectos tienen un aparato respiratorio muy particular: físicamente consiste en un par de aperturas en cada segmento corporal que dan paso a un sistema de tubos, las tráqueas, que se ramifican hasta llegar casi a nivel celular. Estos tubos ponen en contacto el oxígeno del aire con los tejidos internos del insecto, en donde se lleva a cabo la difusión del gas hasta las células. La efectividad de esta difusión es proporcional a la presión parcial del oxígeno en la atmósfera -ver gráfica anterior-: a mayor presión, mayor difusión y mayor disposición de O_2 para el metabolismo. La explicación es intuitiva, ya que cuanto mayor es la concentración de un gas en la atmósfera, mayor es su peso a nivel de la superficie de la tierra, ejerciendo más presión sobre las tráqueas y traqueolas. Si la concentración atmosférica de O_2 alcanza valores tales como el 35%, su tasa de difusión es un 67% más alta que la que se produce cuando la concentración es de un 21%, como la actual. La física premia a estos animales que tienen una función respiratoria basada en la difusión del oxígeno. Quizás sea por esto el que los insectos constituyan el grupo que presenta el mayor número de casos conocidos de gigantismo.

Algo parecido le pudo pasar a algún tipo de anfibio con una dependencia respiratoria cutánea muy grande. Con una mayor presión de oxígeno y/o vascularizando mejor su piel, podían también tener a su disposición mayores cantidades de este gas para su metabolismo, lo que facilitaría también su gigantismo.



El autor jugueteando asustado con una Meganeura en los altos de Morcuera de la sierra madrileña (Imagen de Meganeura: Wikimedia, dominio público)

En el Carbonífero superior aparecen ya fósiles de una gigantesca libélula, el *Meganeura*, que vivió hace 300 millones de años. Con una envergadura de ochenta centímetros y una longitud de un metro, *Meganeura* es el insecto volador más grande de todos los tiempos. Su peso se ha estimado en unos 150 gramos. Como las libélulas modernas, tenía enormes ojos compuestos, fuertes mandíbulas, el cuerpo largo y delgado y patas espinosas. Tanto en su fase de ninfa como en su forma adulta, *Meganeura* era un terrible depredador. La ninfa, acuática, se alimentaba de peces, anfibios y grandes

invertebrados. El adulto, por su parte, capturaba insectos voladores y pequeños anfibios y reptiles utilizando sus grandes mandíbulas.

En esta época del Carbonífero tardío, los insectos consiguieron otro importante escalón evolutivo: la capacidad de doblar las alas hacia atrás sobre el abdomen. Esto les facilitó versatilidad y agilidad para huir de un depredador y esconderse con mayor facilidad, al poder aprovechar para este propósito nuevos nichos, los más estrechos y recónditos, habilidades que con las alas extendidas permanentemente a lo largo de los lados le eran imposibles.

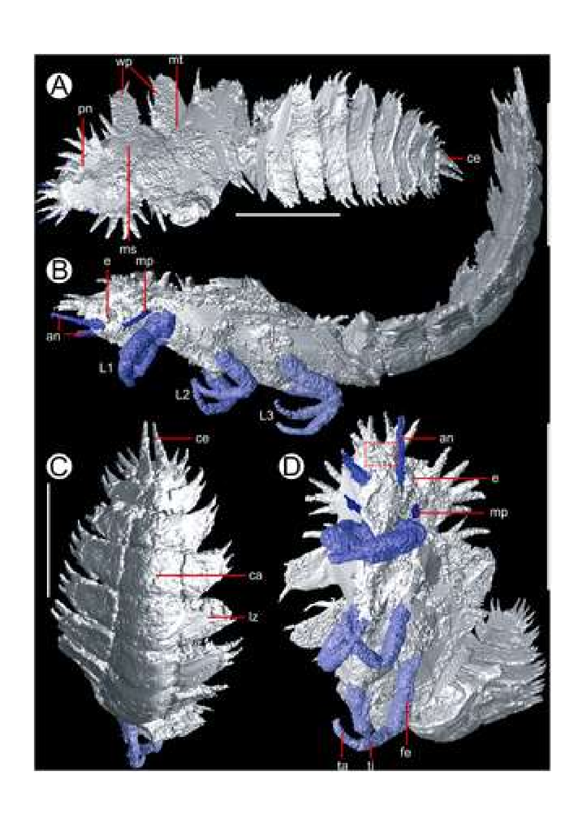
Hemos introducido más arriba a *Palaeodictyoptera* como uno de los gigantes voladores del Carbonífero, del que quiero destacar dos aspectos. El primero relacionado con sus alas ya que disponía de seis, dos pares "normales" podríamos decir y otro par delantero, más pequeño, que posiblemente le servirían para dirigir el vuelo. Un curioso y raro hexáptero. La segunda característica a resaltar es la que ha llevado a su familia a ser conocida como la de los "*súper-chupadores*". Con ellos aparecía por primera vez unos apéndices bucales especializados para taladrar o picar y para succionar. Nos recuerdan a los molestos mosquitos aunque realmente se considera a *Palaeodictyoptera* como los primeros insectos herbívoros ya que se conocen determinados fósiles de tallos y hojas de plantas en los que se observan "mordeduras" que encajan en su forma con el "pico" de estos insectos.

A la par del desarrollo de las alas, algunos insectos iban desarrollando también una estrategia de vida basada en la metamorfosis, que es un proceso biológico por el cual un individuo pasa de joven a adulto a través de una serie de cambios hormonales y morfológicos más o menos complejos. En los estadios más ancestrales del proceso, las larvas -en este caso llamadas ninfas- se asemejaban en gran medida a los adultos, a los cuales se iban acercando mediante sucesivas mudas de su exoesqueleto quitinoso.[2]



Hoja fósil de Viburnum lesquereuxii en donde se reconocen "mordeduras" de insectos herbívoros (Wikimedia, dominio público)

Con posterioridad, y aún en el Carbonífero, los insectos dieron un último salto: desarrollan la metamorfosis completa por la que el proceso introduce unas etapas intermedias en las que las larvas eran completamente distintas a los adultos -un ejemplo serían las orugas con respecto a las mariposas-. Esta nueva habilidad permite hacer más eficaz al insecto, ya que en la fase de larva se especializa en la alimentación, y en la fase de adulto se especializa en la reproducción. Además, adoptar la metamorfosis tuvo ventajas adicionales muy importantes, ya que les permitió beneficiarse de un mayor número de hábitats diferentes: al ser las larvas acuáticas y el adulto terrestre, un insecto dispondría primero de nutrientes acuáticos y luego, de adulto, de un ambiente aéreo/terrestre en el que se incrementaban las probabilidades de encontrar una pareja o de dispersarse. De esta forma, además, nunca competirían un individuo adulto con uno joven. De esta época data el primer hallazgo de un insecto fósil con metamorfosis completa o complicada, una larva en forma de oruga de un tipo que corresponde a un animal parecido a las avispas.



Representación tridimensional de ninfa de un insecto polineóptero del yacimiento de Montceau-les-Mines, Francia (PLOS, ver nota número 2 a pie de capítulo, fair use)

Aunque siendo sumamente importante para su camino evolutivo, no vamos a hablar aquí todavía de la última habilidad de algunos insectos, la sociabilidad, que apareció mucho más tarde durante el periodo Cretácico, en el entorno de hace unos 100 millones de años. Lo haremos en su momento.

Es evidente que los insectos implantaron durante el Carbonífero las bases de su futuro éxito. Actualmente comprenden el grupo de animales más diverso de la Tierra, con aproximadamente un millón de especies descritas, más que todos los otros grupos de animales juntos, y con estimaciones de hasta 30 millones de especies no descritas, con lo que potencialmente representarían más del 90% de las formas de vida del planeta. Las causas del éxito se apoyan en su capacidad de acomodo a todos los tipos de nichos medioambientales tras la extrema adaptación que les supuso abandonar el agua y dispersarse por la tierra firme, con la necesidad imperante de

mantener el grado de humedad adecuado. En este proceso se habría "inventado" el sistema traqueal, cuyos túbulos y opérculos reducían la pérdida de agua durante la respiración; se habría inventado la cutícula impermeable externa, reminiscencia de la de su vida artrópoda marina aunque ahora más manejable; y se habría conseguido la generación de múltiples cuerpos grasos en su organismo, auténticos depósitos de agua con los que el animal podía enfrentarse a periodos de sequía y escasez. Ya hemos comentado cómo la metamorfosis fue otro factor diferenciador de éxito, al que tenemos que añadir el magnífico aprovechamiento de la oportunidad que les daban las plantas, con las que coevolucionaron, primero al alimentarse con sus pólenes ya desde el Devónico, para más tarde hacerlo con los néctares de las flores de las nuevas plantas angiospermas del Mesozoico tardío. Los insectos se aprovechaban de la oferta nutricia y las plantas se apoyaban en los insectos para expandir sus pólenes y semillas y multiplicar su fecundación.

Abandonamos aquí la travesía del mundo de los primitivos insectos y sus esfuerzos por sobrevivir en un mundo seco y hostil. En el capítulo siguiente haremos otro interesante paseo a través de las peripecias de los tetrápodos ya acomodados en tierra y de cómo se las ingeniaron para aprovechar sus oportunidades. Nos esperan los anfibios y los reptiles.

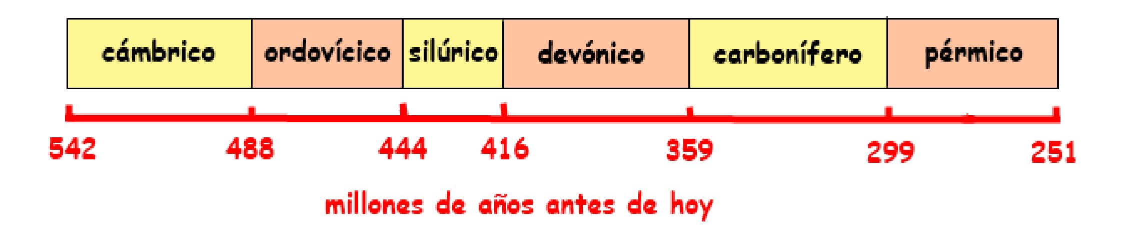
NOTAS DEL CAPÍTULO 35:

1. Podemos verlo en el artículo de PNAS "*Late Carboniferous paleoichnology reveals the oldest full-body impression of a flying insect*", Richard J. Knecht et al., de octubre de 2010 .
2. En el siguiente artículo, "*Tomographic Reconstruction of Neopterous Carboniferous Insect Nymphs*", Russell Garwood et al., publicado en PLOS ONE se reporta la existencia de unas ninfas de insectos ya en el Carbonífero.

36. Anfibios y reptiles del Carbonífero

Con este capítulo completamos el periodo Carbonífero que iniciamos hace dos. Hemos hablado ya del escenario ambiental, de la biota vegetal, hicimos algunos apuntes sobre lo que pasaba en lo más oculto de las aguas oceánicas y completamos el itinerario profundizando en la fantástica vía evolutiva de los insectos. Ahora nos vamos a dedicar a otra excitante aventura: cómo los animales tetrápodos conquistan la tierra y devienen anfibios y reptiles.

Seguimos moviéndonos en el periodo comprendido entre hace 359 y 299 millones de años.



La riqueza de vida animal en los magníficos bosques ecuatoriales del Carbonífero no se acababa en la variada y rica fauna de los invertebrados. Ya conocemos del capítulo 32 la aventura de finales del Devónico cuando algún pez sacó su hocico fuera del agua en busca de la sabrosa comida que suponía la primera colonización terrestre de los artrópodos. Sin embargo, el salir fuera del agua conllevaba a su vez muy serios problemas. La piel necesitaba mantener la humedad para que no se degradara y las puestas de huevos debían seguir haciéndose en un medio líquido, como sus abuelos peces, para que no se desecaran. En aquellos momentos iniciales del Carbonífero el hábitat terrestre era un lugar de tránsito en donde buscar el alimento para volver de nuevo a las aguas que no

se podían abandonar completamente, una necesidad imperiosa para los anfibios. Aún faltaba un poco de tiempo para que los reptiles llegaran al "descubrimiento" del huevo blindado, el amniótico, que les permitiría olvidarse de la dependencia absoluta del agua.

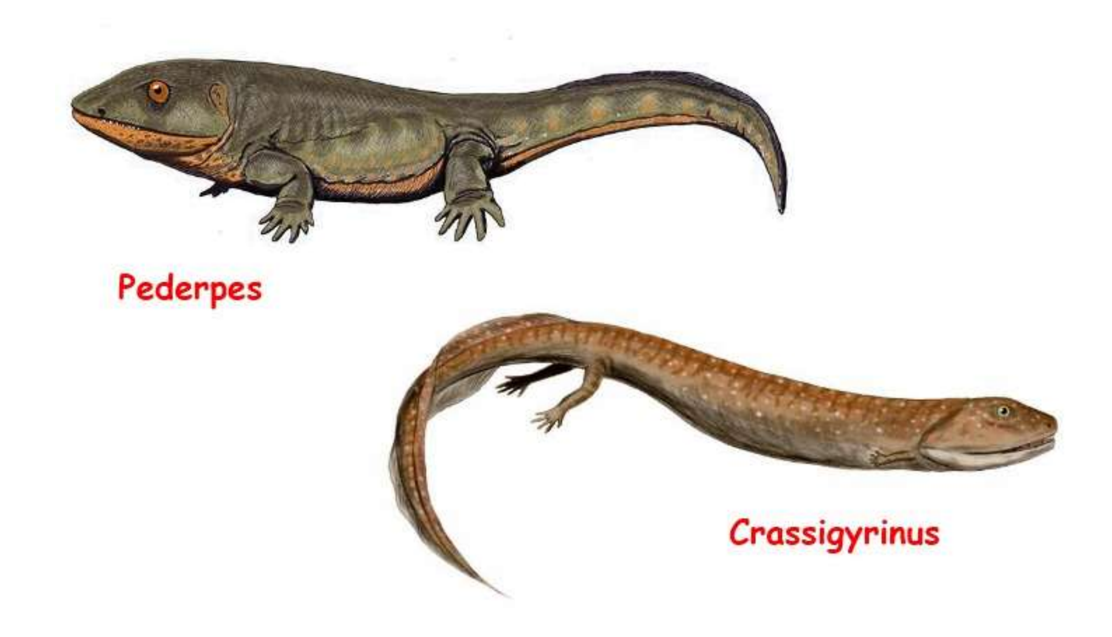
Primeros tetrápodos exitosos: los anfibios

En el Carbonífero inferior los anfibios no se parecían demasiado a sus parientes actuales. Consiguieron un amplio espectro de formas y modos de vida, desarrollando todo tipo de sistemas mecánicos para aguantar su peso, mantenerse en pie y moverse sobre la tierra. En su mayoría tenían forma semejante a la de las salamandras, e incluso alguno se asemejaba a los cocodrilos. Otros desarrollaron una segmentación exagerada, tomando forma de serpientes sin patas o con unos pequeños apéndices. En aquella época aún no se había desarrollado la morfología de las ranas.

El registro fósil de tetrápodos terrestres y de peces tetrapodomorfos de inicios del Carbonífero es conocido por su pobreza y por su nombre: "brecha de Romer" en honor al paleontólogo que lo estudió. Supone una discontinuidad entre los registros de los primitivos bosques y la alta diversificación de los peces del Devónico, y los de las formas más modernas y evolucionadas de los seres acuáticos y terrestres del Carbonífero. De tal manera que, datados en los primeros 15 a 20 millones de años de este último periodo, sólo se han encontrado unos pocos ejemplares fósiles. Casi todos ellos en yacimientos escoceses, como el del primitivo tetrápodo *Pederpes*, el pequeño protoamniota *Casineria* de 15 centímetros o los *Lethiscus* y *Crassigyrinus,* animales sin patas semejantes a una serpiente. Todos ellos solían ser de un tamaño más pequeño que el de los tetrápodos del Devónico.

Posiblemente esta tendencia a la disminución corporal fue una respuesta evolutiva consecuencia de las aún relativamente bajas concentraciones de oxígeno atmosférico a inicios del periodo. Para un animal dependiente de la absorción cutánea de este gas, el bajo

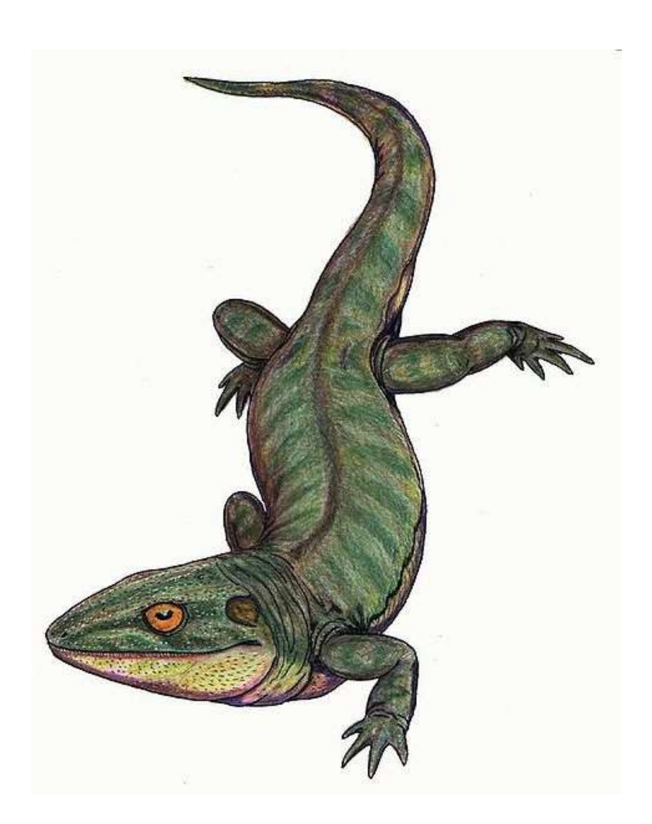
contenido del mismo le obligó a explotar la ventaja que suponía la progresivamente favorable relación superficie/volumen al ir disminuyendo su tamaño. Un factor 1/2 en la envergadura suponía un factor 1/4 en la superficie corporal, camino de entrada del oxígeno, y un factor 1/8 en el volumen donde se llevaban a cabo las reacciones metabólicas.



Representación artística de Pederpes y Crassigyrinus (Wikimedia, GFDL 1.2)

Durante esta época oscura, y a pesar de que no dispongamos de demasiadas evidencias de ello, la Vida inevitablemente tuvo que seguir adelante. En estos años sin referencias se tuvieron que desarrollar aquellas innovaciones que vamos a observar como realidades justo después. A la salida de la "Brecha de Romer" nos vamos a encontrar con un buen número de variedades morfológicas y filogenéticas, que se concretan en tetrápodos de una gran variedad de tamaños, estructuras craneales, formas corporales y hábitos, patrones estos que fueron muy distintos a los de los animales del Devónico. **En este intervalo de 20 millones de años se habituaron a vivir en tierra y a respirar directamente el aire**, aunque desgraciadamente aún no sabemos cómo se produjo el proceso.

Pasados estos primeros años ciegos se comienza a disponer de información. En su mayoría proviene de fósiles encontrados en un yacimiento escocés, próximo a la ciudad de East Kirkton, datado alrededor de hace 340 millones de años. Este yacimiento se formó mediante los sucesivos depósitos que se iban decantando en el fondo de un lago no muy profundo situado en un entorno con gran abundancia de vegetación y con la evidente presencia de conos volcánicos. La mayor parte de la biota que allí se encontraba estaba constituida por plantas propias de la época, como gimnospermas y pteridospermas, así como animales terrestres entre los que se reconocen ejemplares de miriápodos y quelicerados, y los primeros representantes de la mayoría de los principales grupos de anfibios que dominaron el resto del Carbonífero: temnospóndilos, anthracosaurios, lepospóndilos aistópodos y lepospóndilos microsaurios, de los que damos unas breves pinceladas a continuación.



Representación artística del temnospóndilo Dendrerpeton (Wikimedia, dominio público)

Los temnospóndilos, que se originaron hace 340 millones de años, presentaban un estilo de vida semiacuático y tamaños diversos, desde unos treinta centímetros hasta quizás unos diez metros. Ya hacia finales del Carbonífero y a comienzos del siguiente período, el Pérmico, un gran número de grupos desarrollaron extremidades y vértebras robustas, adaptándose a un estilo de vida terrestre. Los numerosos dientes cónicos y duros, sumados a los grandes colmillos palatales, sugieren que eran depredadores, carnívoros, insectívoros, piscívoros o cualquier combinación de estas formas de alimentación.



Representación artística de una cabeza de Anthracosaurus russelli un animal semejante a una serpiente (Wikimedia, dominio público)

El *Anthracosaurus* vivió hace aproximadamente 310 millones de años. Habitó en pantanos, ríos y lagos de tierras que hoy en día son parte de Escocia. Fue un gran depredador acuático similar a las serpientes, pudiendo haber alcanzado más de tres metros de longitud. Sus mandíbulas estaban provistas de dientes puntiagudos.

Los *lepospóndilos aistópodos* eran animales altamente especializados de hábitos predominantemente acuáticos. Semejantes a las serpientes y de tamaño por lo general reducido, exhibían una gran diversidad de formas y adaptaciones, de forma que filogenéticamente hay entre cuatro y seis grupos reconocidos.

Presentaban un cuerpo particularmente alargado, de entre cinco centímetros y casi un metro de longitud, con una reducción en las extremidades y la pelvis. Sus primos los *lepospóndilos microsaurios* se asemejaban a las salamandras, con especímenes de todos los tamaños, ya fueran animales relativamente grandes que podían poseer un largo total de sesenta centímetros o más pequeños con cráneos que no medían más de siete milímetros.



(Imágenes a partir de wikimedia, GFDL 1.2)

Interludio

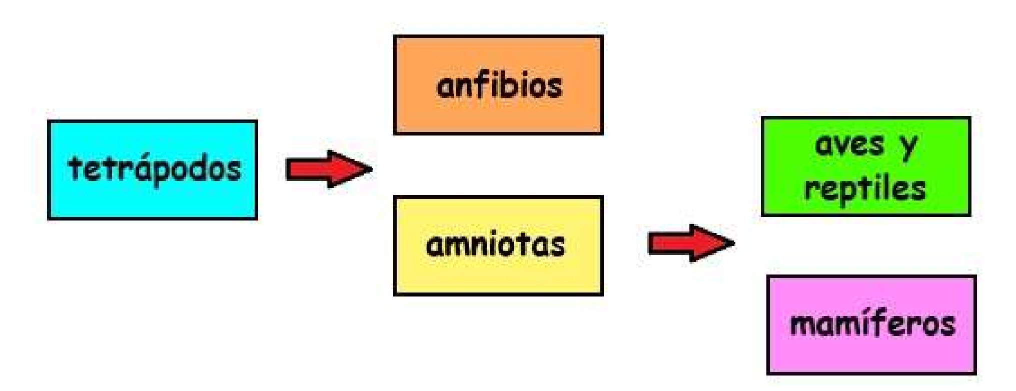
Hace 305 millones de años, al final del Carbonífero, se produjo un episodio de extinción llamado el **"colapso de las selvas lluviosas"**, que se produjo abruptamente a lo largo de unos pocos años. El descenso de la concentración de CO_2 y la paralela glaciación en Gondwana introdujo un cambio climático caracterizado por el frío y la sequía, que poco a poco devastó las exuberantes selvas tropicales, fragmentándolas en "islotes" separados confinados en valles húmedos cada vez más distantes y que supuso la extinción de muchas especies de plantas y animales. A lo largo de este episodio los helechos se transformaron en plantas oportunistas que fueron ahogando poco a poco los bosques de licopodios, siendo sustituidos

por helechos arbóreos. Por el contrario, los bosques de coníferas, que poblaban latitudes más altas y que estaban mucho mejor preparados para afrontar la aridez, no se vieron seriamente afectados.

Tras los anfibios, los reptiles

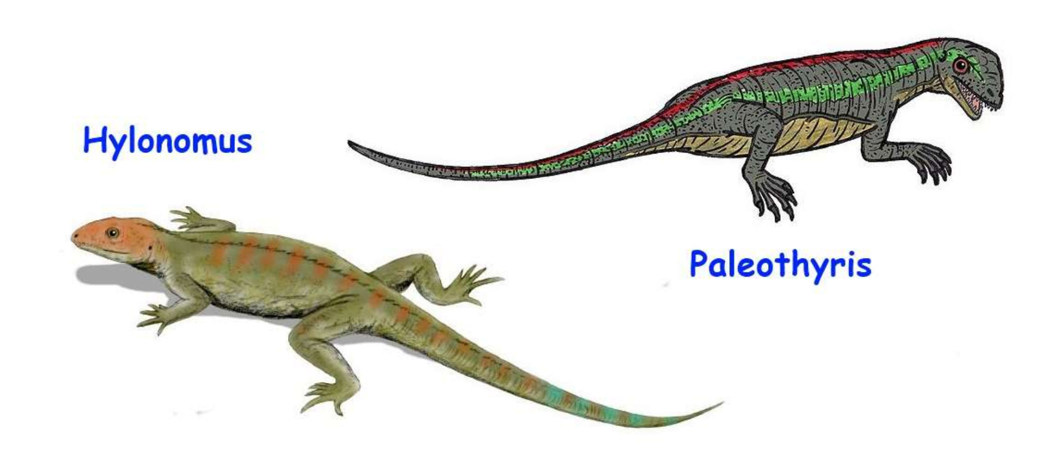
El colapso de los bosques perjudicó en gran medida el desarrollo de los anfibios, los cuales no podían soportar bien aquellas condiciones secas y frías. Por el contrario, los incipientes reptiles se encontraban corporalmente mejor adaptados para sobrellevar estas extremas circunstancias climáticas. Fue trascendental el haber modificado sus huevos, blindándolos con varias capas que impedían que se desecaran: el **huevo amniótico** que luego adoptaron todos sus descendientes, aves y mamíferos.

Los reptiles provenían de una evolución de los primeros tetrápodos. Los más ancestrales fueron los reptiliomorfos que son un grupo de tetrápodos que *reúnen a la vez características de reptiles y de anfibios*. Se originaron a comienzos del Carbonífero, y lo mismo había especímenes que vivían en agua como en hábitats terrestres. De ellos derivaron los amniotas que luego se diversificarían en dos líneas, los reptiles y aves y los mamíferos.



El reptilimorfo *Antracosaurio*, que etimológicamente significa el "*lagarto del carbón*" y del que ya hablamos como anfibio un poco más arriba, pudo ser el ancestro común de la rama de los amniotas. De él evolucionaron los pequeños y ligeros captorrínidos, familia que agrupa a los reptiles más ancestrales, entre ellos el

Paleothyri (300 millones de años) o el *Hylonomus* (315 millones de años). Eran animales de unos 20 centímetros de longitud, parecidos a un lagarto, que aún mantenían las patas extendidas hacia los lados y que tenían la cabeza pequeña, de la que habían mejorado la movilidad al haber separado del cráneo las dos primeras vértebras cervicales. Tenían el esqueleto ligero con una cola larga terminada en punta y dedos largos y muy finos. Serían insectívoros que se desplazaban silenciosamente a través de la vegetación baja para cazar grandes insectos y ciempiés. Y, lo más importante, **fueron los primeros amniotas verdaderos**.



Representación artística de los reptiles Hylonomus y Paleothyris (Imágenes de wikimedia, GFDL 1.2 y CC BY-SA 3.0 Unported)

Los amniotas del Carbonífero tardío, hace 300 millones de años, habían conseguido unas habilidades muy competitivas que les permitieron desarrollarse de forma espléndida. Ya en aquella época incluían unos veinticinco géneros de pequeños a medianos reptiles comedores de insectos. Esto indica que su camino evolutivo fue mimado por la selección natural. Veamos cuáles fueron las mejoras de diseño que consiguieron.

La más importante y ya comentada es la del huevo amniota (considerando *huevo* como cigoto, siendo el de las aves, con su cascarón cálcico, un caso particular). En este tipo de huevo el

embrión se rodea durante su desarrollo con tres membranas. El amnios que rodea y protege al embrión que flota en el líquido amniótico, el alantoides que hace de receptáculo de los desechos nitrogenados y que contiene aire para que el embrión pueda respirar, y el corion que rodea toda la estructura embrionaria y que está altamente irrigado de sangre, por lo que sirve realmente de órgano respirador. No hay que confundir ninguna de estas membranas con la externa del huevo, común como concepto de diseño con la de los huevos de los anfibios, y que con el paso del tiempo evolutivo se endurecería formando un cascarón.



Huevo amniótico

Esta estructura no sólo blindaba al embrión contra la desecación, como ya se ha comentado, sino que permitía también su completo desarrollo dentro del huevo naciendo ya con su forma definitiva de adulto, lo que hacía que prosperara luego con mayor rapidez. Gracias a ello los animales amnióticos cambiaron de estrategia vital por contraste a la que tenían los vertebrados acuáticos –peces y anfibios-, optando por unas tasas de natalidad bajas (pocos huevos) unidas a un índice de mortalidad también pequeño (éxito vital). Adaptan su volumen poblacional al tamaño máximo que puede soportar el

ambiente -hábitat, agua o alimento- donde se encuentran. Incluso en ocasiones "se toman" un margen, asegurando a los individuos más recursos de los que pueden llegar a consumir, circunstancia que garantiza la gran estabilidad de sus hábitats y formas de vida. Tienen pocas crías, aunque bien cuidadas.

Como uno puede imaginar el huevo amniota se consiguió a través de múltiples e inapreciables cambios, orientados por la selección natural. Los primeros no debían ser muy diferentes de los huevos de los peces o de los anfibios. De hecho los protorreptiles eran animales semiacuáticos, por lo que pondrían sus huevos protegidos por una membrana, en el agua o en sitios húmedos, rodeados de una mucosa segregada a su paso por el oviducto. Esta mucosa les ayudaba a combatir los efectos de una sequía ambiental. La tendencia sería hacia huevos más grandes, ya que este tipo de cigotos tenían mayor probabilidad de supervivencia.

El primer paso evolutivo por el que se iniciaba la nueva realidad del huevo amniótico se concretó con la aparición de un saco en la porción terminal del intestino del embrión, en donde se retenían sus desechos y la orina, con lo que se evitaba la pérdida de agua que esto supone en los anfibios. Este saco fue el *alantoides,* cuya membrana era muy rica en vasos sanguíneos mediante los cuales se comenzó a realizar el intercambio de gases CO_2 y O_2 con el exterior, haciendo cada vez menos necesario el desarrollo de branquias respiradoras.

Una primera invaginación de la membrana del alantoides rodeó el embrión formando el *amnios,* con funciones de protección similares a la que desarrolla la placenta en los mamíferos. Una segunda invaginación creó la tercera membrana, el *corion*, que rodeó a toda la estructura embrionaria: la cápsula amniótica con el embrión, el saco vitelino con el alimento y la cápsula alantoides, intercambiador de gases y agua.

El último paso evolutivo fue consecuencia de la transformación de la mucosa protectora exterior, la que se había generado en el

oviducto. Quizás esta transformación ya comenzó a producirse en el propio oviducto, que generó una sustancia más fibrosa que la gelatina, dando como resultado una cobertura del huevo más resistente, por lo que a la vez tendría una menor necesidad de agua para su mantenimiento. Es decir, la cáscara progresivamente se iba mineralizando, elevando a la enésima potencia la protección del embrión frente a ambientes secos.

Muchos creen que el éxito del huevo amniótico se adelantó al abandono de los medios acuáticos por los adultos y que fue el inductor de la adaptación de los vertebrados a los medios terrestres, que se afirma y se diversifica con los reptiles: primero fue el huevo en la tierra y después le siguió el adulto.

La vida sobre la tierra seca exigió una adaptación del esqueleto que tenía que soportar el cuerpo sin ningún medio externo que le ayudara, como era el caso de los animales acuáticos. El nuevo esqueleto requirió cambios musculares, avances en la estructura de las vértebras y miembros, y coordinación del movimiento en las cuatro patas. Los reptiles con patas tienden a tener extremidades grandes y fuertes que les permiten caminar, correr, excavar, nadar o trepar. Además, las patas suelen ocupar posiciones más ventrales que en los anfibios, lo que les permite cargar más peso. Músculos más fuertes que inducían cambios en el aporte de sangre y, como resultado de esta nueva exigencia, cambios en el corazón, el pulmón y los vasos sanguíneos. El pulmón de los reptiles incrementó la capacidad de intercambio gaseoso, mientras que el corazón desarrolló un doble circuito separado junto con el sistema de arcos aórticos, estructuras más preparadas para llevar sangre oxigenada al cerebro.

La vida en tierra también trajo modificaciones en los sentidos, particularmente el oído, aunque no llegó a ser muy diferente al que ya disponían los anfibios, que utilizaban el arco hiomandibular [1] para transmitir los estímulos al oído interno. Se modificó el paladar y la musculatura de la mandíbula, que desarrolló potentes

inserciones en los huesos, lo que facilitaba el agarre de las presas. Esta circunstancia sugiere a su vez modificaciones en el comportamiento alimentario, que posiblemente pasó de vegetariano a insectívoro. La alimentación requirió de una nueva habilidad para hacer frente al alimento seco, teniendo que humedecerlo con la saliva. El desarrollo de un cuello móvil facilitó los trascendentales movimientos de la cabeza necesarios para examinar los alrededores y capturar el alimento, coordinándolos a la vez con los movimientos del cuerpo. Estas habilidades de coordinación exigieron un mando central desarrollado. Así, el cerebro experimentó sustanciales avances, desarrollando la zona que recibe los estímulos de los ojos, oídos y miembros.

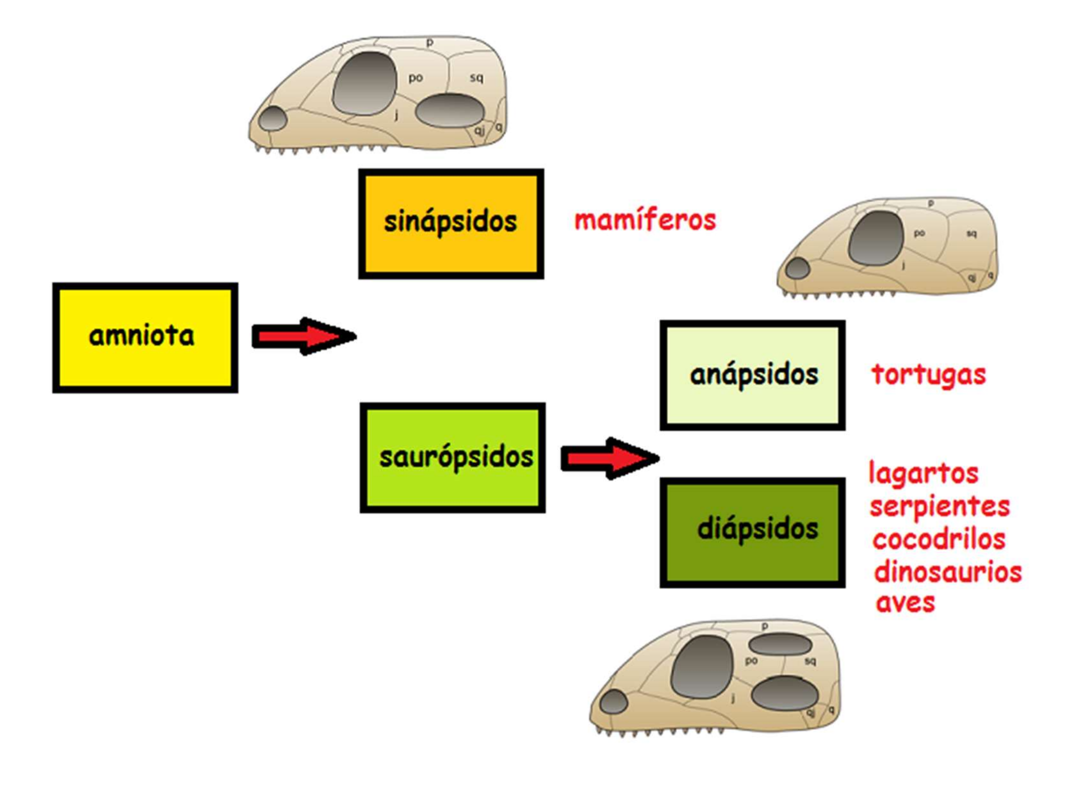
Pero lo más importante fue la conservación del agua corporal. Esto se realizó principalmente a través de la especialización del funcionamiento del sistema excretor. La orina de algunos reptiles contiene amoniaco y, en otros, ácido úrico. Los reptiles que viven principalmente en el agua, como los cocodrilos y caimanes, excretan la mayor parte de sus desechos nitrogenados en forma de amoniaco, un compuesto tóxico. Para ello, los caimanes y cocodrilos beben mucha agua, con lo que diluyen el amoniaco de la orina y les ayuda a expulsarlo. En contraste, muchos otros reptiles, sobre todo los que viven exclusivamente en tierra firme, no excretan amoniaco directamente. En vez de ello, lo convierten en ácido úrico. El ácido úrico es mucho menos tóxico que el amoniaco, así que no hace falta diluirlo mucho. Además, en estos reptiles el exceso de agua se volvía a absorber en la cloaca, convirtiendo la orina en cristales de ácido úrico que forman un sólido blanco y pastoso. La pérdida de agua era mínima.

Por otro lado, la impermeabilización de su piel ayudó en la economía de agua. Estaba queratinizada y cubierta por escamas que surgían como espesamientos y repliegues de la capa córnea de la piel, simples relieves epidérmicos que, aunque puedan recordar a las escamas de los peces, son totalmente diferentes. Al igual que los reptiles actuales, no dispondrían de glándulas sudoríparas, en la línea

de minimizar por todos los medios la pérdida del agua corporal. Las únicas glándulas que tendrían les servirían para excretar sustancias de sabor y olor desagradable como estrategia de defensa, o feromonas con las que atraer a las hembras.

El "invento" del huevo amniota fue un duro palo para los anfibios. Los amnióticos tenían una baza de triunfo en su mano que utilizaron al máximo para encontrar nichos ecológicos y dominar en ellos. Es bien cierto que a partir de este hecho los hasta entonces dominantes anfibios comienzan una decadencia como clase, que llegaría a ser crítica a mediados del siguiente periodo, el Pérmico, en donde hace unos 260 millones de años habían desaparecido la mitad de las especies anfibias, quedando 15 millones de años después sólo los residuales temnospóndilos.

Antes de acabar con este denso periodo del Carbonífero, avancemos un apunte filogenético que desarrollaremos en el capítulo del Pérmico: el camino evolutivo de los amniotas.



Fiologenia de los amniotas (Imágenes de wikimedia, GFDL 1.2)

Como podemos observar en la figura anterior, la filogenia evolutiva de los amniotas está basada en la forma y número de fenestras a cada lado del cráneo tras la órbita ocular. Las fenestras temporales hacen que el cráneo sea más ligero y permiten la inserción de músculos que accionan la mandíbula inferior.

Ya comentamos más arriba que los primeros amniotas en aparecer en el registro fósil debieron ser los anápsidos captorrínidos, aunque poco después, durante el período Carbonífero superior, hace unos 320 millones de años, emergieron los sinápsidos. Entre los más antiguos de estos últimos están los pelicosaurios *Archaeothyris* y *Clepsydrops*. Eran pequeños animales insectívoros y, aunque tuvieran apariencia de lagartos, no guardaban ninguna relación con ellos.

De todos ellos hablaremos en la crónica del próximo periodo, que comenzaremos a desarrollar en capítulo que sigue.

NOTAS DEL CAPÍTULO 36:

1. Se conoce como **arcos branquiales** o **arcos faríngeos** a las estructuras a modo de hendiduras situadas a ambos lados de la faringe que se originan durante el desarrollo embrionario de los animales del filo cordados.

37. El Pérmico: Fin del Paleozoico

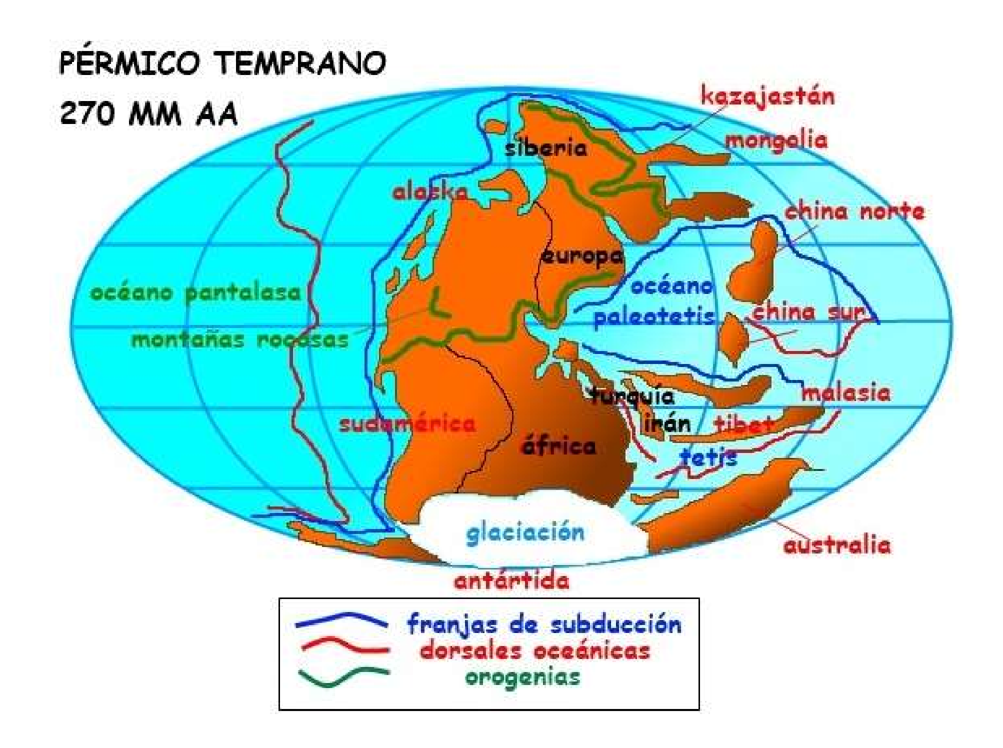
En el capítulo anterior nos despedimos del activo periodo Carbonífero. Hoy corresponde seguir adelante y adentrarnos en el desafortunado Pérmico.

Se extiende a lo largo de una prolongada etapa de casi 50 millones de años: desde los 299 hasta los 251 antes de hoy.



Este nuevo periodo debe su nombre a los extensos yacimientos de fósiles que corresponden a esta época que se encuentran en las cercanías de la ciudad rusa de Perm, próxima a los Urales. Es el periodo en el que se consolidó Pangea, circunstancia que trajo consigo una época de clima seco y extrema aridez en las tierras. No es de extrañar, por tanto, el éxito alcanzado a lo largo de estos años en la radiación de los reptiles, animales muy preparados para estas circunstancias.

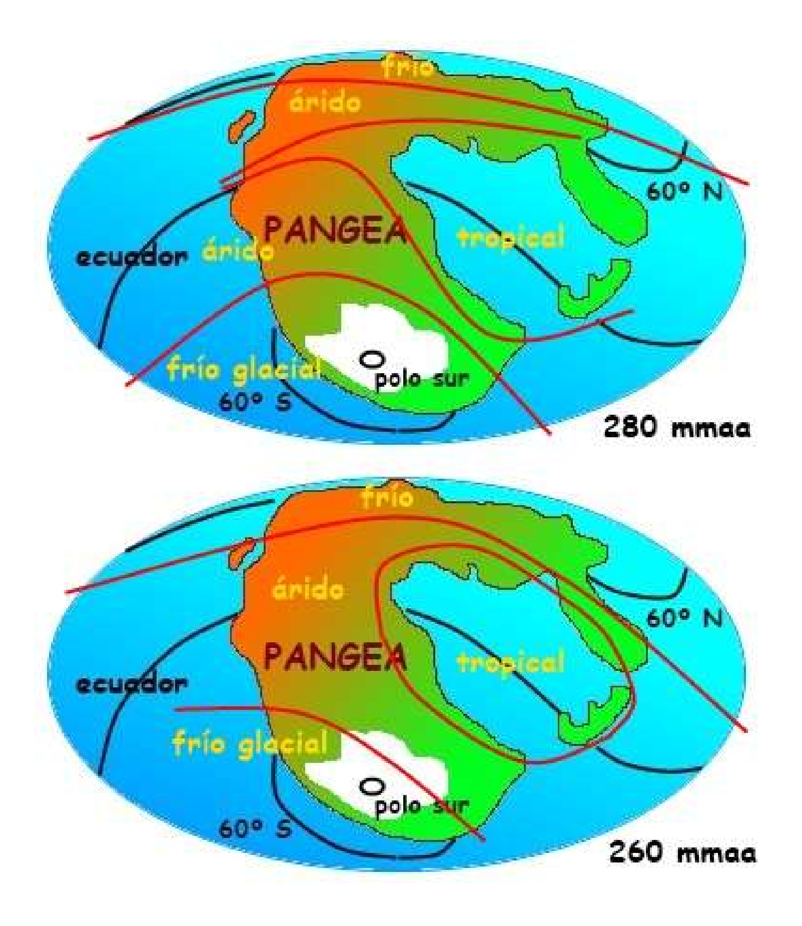
Este periodo finalizará con la mayor extinción conocida de especies. De ahí el apelativo que le he dado de “desafortunado”.



Por fin se unieron todos los continentes errantes formando uno único, Pangea, que tomaría una posición norte-sur. Prácticamente iba de polo a polo y ocupaba aproximadamente una sexta parte de la circunferencia del ecuador. En su interior quedó cerrado el antiguo mar de Tetis. El océano que rodeaba a Pangea era único y tremendamente inmenso, llamado por ese motivo Pantalasa (del griego "*todos los mares*"). El nivel de las aguas era bajo como consecuencia de los glaciares del sur.

Pero su orientación geográfica suponía realmente una barrera continental que alteraba las corrientes marinas y las de aire. Las costas orientales estaban bañadas por flujos templados, mientras que en la costa oeste se iba implantado un clima más frío. El territorio era tan vasto y con un centro tan alejado del mar, que era muy difícil que llegaran las lluvias a su interior. La ausencia de relieves importantes no facilitaba la formación de nubes ni de lluvia y restaba fuerza a los monzones, que en aquella época se formarían muy potentes y con una gran energía, dadas las diferencias térmicas entre mar y tierra. Pangea llegó a ser un continente caluroso, seco y desértico, sobre el que se fue reduciendo la superficie ocupada por

glaciares, quedando éstos confinados sobre grandes extensiones polares y en las cordilleras montañosas del oeste.



Evolución zonal del clima interior de Pangea durante el Pérmico en tan solo 20 millones de años.

Las condiciones áridas y secas del centro continental provocaron la desecación de los pocos mares interiores que iban quedando. Un ejemplo de ello fue el mar de Zechstein, un mar interior extremadamente salado, que a lo largo del Pérmico cubrió una buena parte de Europa. Su progresiva desecación formó unas grandes cúpulas sedimentarias del mineral evaporita que preservaron los extensos campos de gas que actualmente se explotan en aquella zona. Otro caso de evaporación de mares interiores lo encontramos en Paradox Basin al sureste de Utah y Colorado, en Estados Unidos. Cubre un área de alrededor de 85.470 km², alcanzando los estratos sedimentarios en algunos lugares más de 4.600 metros de espesor .





Situación del mar de Zechstein sobre los territorios europeos actuales y vista general de una explotación minera de potasas en la zona de Paradox Basin (Foto: Nelson Minar, fair use)

El reino de las plantas

En tierra, las plantas evolucionaron siguiendo la batuta del clima. A medida que pasaban los años, las zonas húmedas y templadas iban disminuyendo, quedando limitadas al círculo costero del mar de Tetis. Los bosques de marisma, tan potentes en el Carbonífero, fueron también menguando y perdiendo parte de su variedad.



Hoja de ginkgo y cono de cícada (Wikimedia, GFDL 1.2)

Los *Calamites* y *Lycopodios* fueron disminuyendo de tamaño, quedando como arbustos. Fueron reemplazados progresivamente en sus territorios, ahora más áridos, por aquellas plantas que habían evolucionado haciéndose resistentes a las condiciones ambientales secas. Entre ellas, los helechos con semilla, que prosperaron en el hemisferio sur de Pangea, y las coníferas. El resultado fue que en esta época dominaron definitivamente las plantas gimnospermas, como lo son las propias coníferas, o las nuevas subclases que aparecen ahora por primera vez: los ginkgos, que se supone derivaron de los helechos con semilla, y las cícadas.

El reino animal

La vida en los mares y océanos por lo general fue una continuación de la del Carbonífero. Grandes arrecifes y el dominio de los tiburones.

Mientras, en tierra firme los **insectos** continuaban su expansión, explotando las habilidades adquiridas con anterioridad. Eran animales muy versátiles, con seis ágiles patas, dos pares de alas retráctiles, unos sentidos desarrollados, como su vista y sus antenas "olfatorias", una eficiente estructura bucal, un sistema digestivo que podía con todo y un exoesqueleto de quitina que les daba soporte y protección, lo que suponía una gran ventaja sobre otros animales herbívoros.

Ya sabemos que la concentración del oxígeno atmosférico se había incrementado significativamente durante el Carbonífero. Sin embargo, en el inicio del Pérmico comienza a experimentar un descenso. Estudiando los fósiles de las alas de los insectos de esta época se ha podido comprobar que muchos de ellos fueron variando de tamaño, creciendo y menguando según lo hacía la concentración atmosférica de aquel gas. Ello parece afianzar la hipótesis ya explicada en el capítulo 34 de que a mayor presión de oxígeno en la atmósfera mejor era la capacidad de oxigenación de los insectos, y

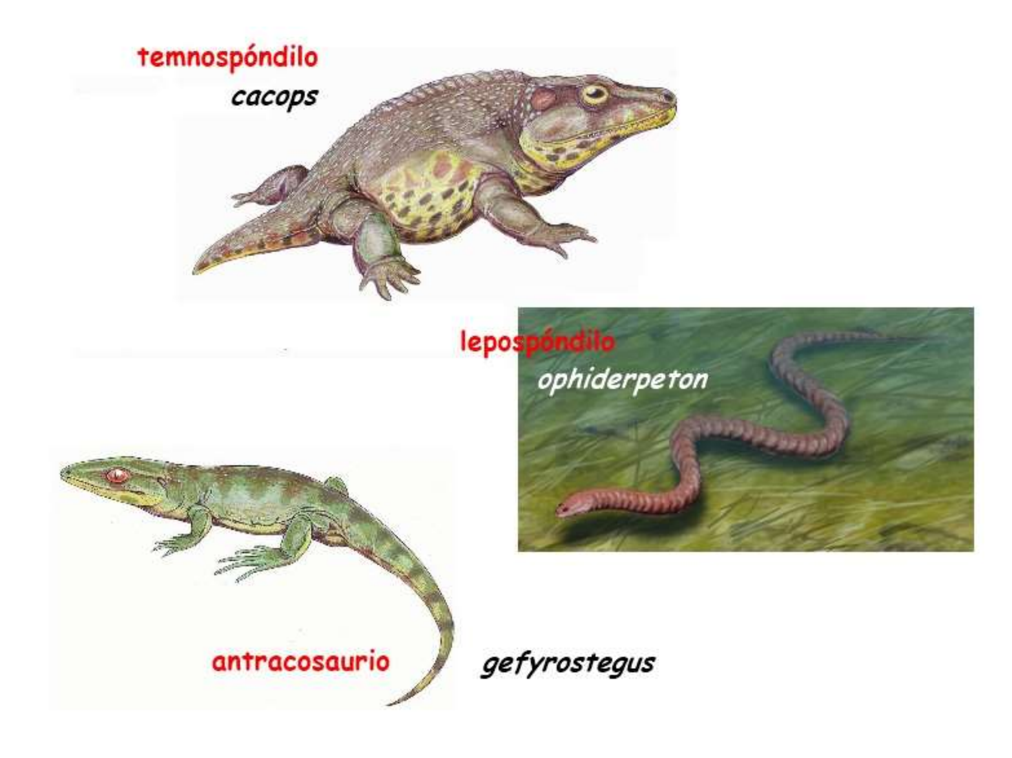
por tanto más activo y eficiente era su metabolismo, lo que conducía al final a un gigantismo corporal.

Es en esta época cuando aparecen los más primitivos coleópteros -del griego κολεός *koleos*, "caja o estuche" y πτερον *pteron*, "ala"-, los escarabajos, que en aquella época ocupaban el 90% del nicho de los insectos y que actualmente sigue siendo el orden dominante de esta clase, con unas 375.000 especies descritas. Los más ancestrales se caracterizaban por tener unos élitros -el par de alas anteriores modificadas por endurecimiento- decorados con unos patrones reticulados y una forma aplanada que sugiere que habitaban bajo la corteza de los árboles. Sin embargo, habrá que esperar hasta mediados del Triásico, hace unos 230 millones de años, para ver aparecer a los primeros escarabajos propiamente dichos, los cuales alcanzaron una enorme diversidad a finales del Jurásico, 95 millones de años después de que acabara el Pérmico.

Los himenópteros -del griego υμεν *hymen*, "membrana" y πτερον *pteron*, "ala"- tales como las hormigas, abejorros, abejas y avispas, constituyen una de los órdenes hermanos de los coleópteros dentro de la clase Insecta. En la actualidad hay catalogadas unas 125.000 especies. Según algunos estudios filogenéticos, estos insectos también se habrían diversificado durante esta época, hace unos 300 millones de años. Los más primitivos fueron los sínfitos, cuyo nombre proviene del latín *symphytum*, que significa "unido", y hace referencia a que no existe un estrechamiento que separe el tórax del abdomen, lo que se conoce como "cintura de avispa". La anatomía básica de los sínfitos se ha mantenido prácticamente inalterada desde entonces. Estos primeros himenópteros se alimentaban de plantas, ampliando más adelante su dieta con la madera. Aunque haya que esperar para encontrar el fósil más antiguo de himenóptero hasta el Triásico, hace unos 230 millones de años, estos animales tendrán su gran desarrollo durante el periodo Cretácico.

Mientras las "cucarachas" imponían su baile en el Pérmico y los **anfibios** resistían a duras penas la sequía ambiental, los amniotas

vertebrados que habían abandonado el Carbonífero como unos pequeños lagartos, disfrutaban plácidamente de la creciente aridez del clima ¡qué diferente debía ser lo que opinaban los anfibios! Estos últimos cada vez tenían menos espacios vitales, las marismas costeras y las charcas de rivera donde habían aventurado su vida al salir del mar eran cada vez más escasas. Y bien sabían que necesitaban del agua y la humedad: sus pieles y sus huevos eran demasiado delicados. Los insectos, con sus exoesqueletos de quitina, habían podido iniciar la emigración hacia zonas terrestres del interior. Pero los anfibios no, seguían atascados junto a las olas que rompían en las raíces de los manglares, cada vez más salinizados, cada día con un sol más crecido. Es cierto que las lluvias monzónicas eran terribles, pero casi ni se adentraban en el continente. Las montañas de las orogenias de los últimos millones de años atravesaban Pangea de costa a costa siguiendo la línea del ecuador, por lo que apenas oponían resistencia a las terribles nubes que se generaban en el mar y viajaban a velocidades de vértigo gracias a la diferencia de temperaturas entre agua y tierra.



Anfibios del Pérmico temprano (Wikimedia, GFDL 1.2)

Los anfibios lo tenían difícil, la naturaleza ya no era su aliada y les empujaba a reducir sus poblaciones. Los órdenes abiertos en el Carbonífero con los temnospóndilos, lepospóndilos y antracosaurios, hacían lo que podían para sobrevivir en el estrecho anillo junto al mar de Tetis.

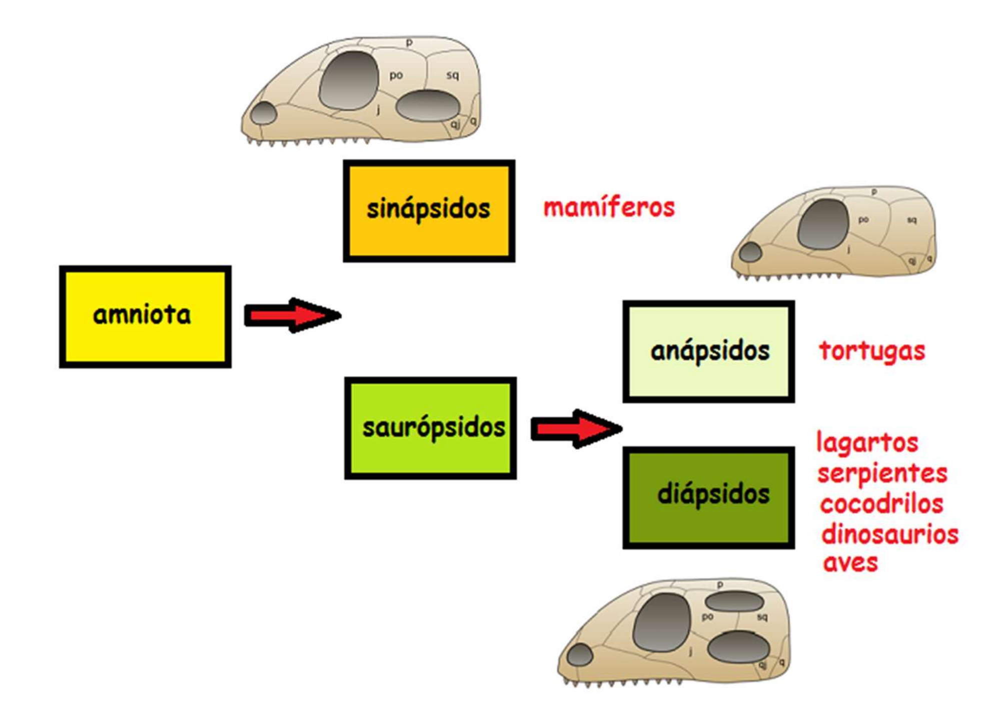
Sin embargo, el sol salía para todos. Les había costado, pero algunas plantas y animales habían salido favorecidos en el reparto de cartas de las mutaciones genéticas y la selección natural. Frente a la sequía… buenas soluciones: xerificación y quitinización, semillas duras y huevos con cascarón. Las tierras secas que dominaban los horizontes de los anfibios eran oportunidades para las plantas gimnospermas y para los tetrápodos amnióticos. Y fueron conquistando mayores latitudes penetrando tímidamente en los seis mil kilómetros del ancho de Pangea: primero las coníferas y familia, a su sombra y protección, los reptiles e insectos.

En esta aventura los escarabajos servirían de alimento a algunos sinápsidos lagartiformes, los pelicosaurios, que estaban comenzando una interesante especialización modelando a un pequeño grupo dentro de la familia de los amnióticos, camino de los mamíferos.

Poco después, el resto del club amniota, los saurópsidos, se diversificó en dos nuevas líneas evolutivas que les llevaría, por un lado, a las actuales tortugas, y por otro lado, a los dinosaurios, con sus nietos las aves, y al resto de reptiles actuales, lagartos, cocodrilos y serpientes.

Como estamos viendo, el periodo Pérmico contempló el desarrollo de una panoplia completa de animales y la aparición de los grandes herbívoros y carnívoros.

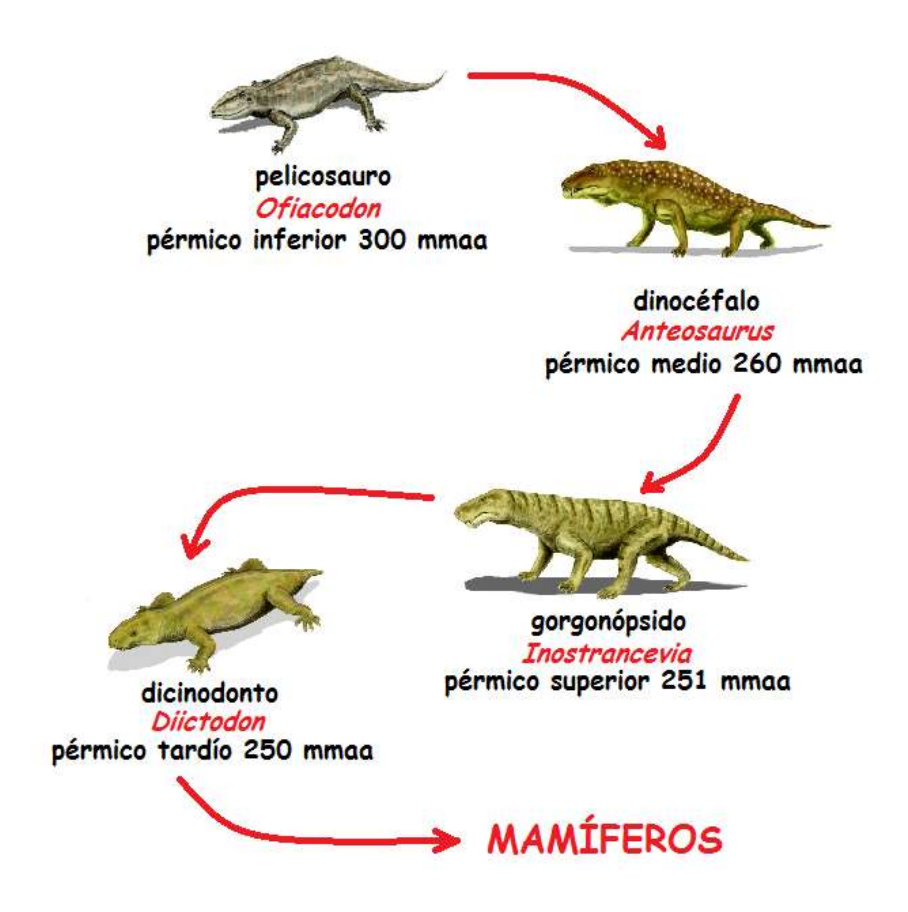
Antes de comenzar con un poco de más detalle la evolución de los amniotas durante el Pérmico, repetimos, como ayuda para la memoria, su libro de familia con el que cerrábamos el capítulo anterior del Carbonífero.



Veamos cómo continúa la saga.

Hemos comentado un poco más arriba que a medida que avanza el Pérmico los *mamiferoides pelicosaurios* se fueron diversificando hacia un nuevo orden de tetrápodos, los **terápsidos**, que durante la fase media del Pérmico fueron los que dominaban el mundo de los reptiles y que dieron lugar, casi en la frontera con el Triásico, a los "mamíferos" más ancestrales: los cinodontos.

En el camino, los terápsidos adoptaron muchas modificaciones corporales. Los menos avanzados, los ***dinocéfalos*** "cabeza terrible", aún compartían características con los pelicosaurios, pero ya habían modificado su hueso ilíaco y tenían miembros más rectos, lo que evidentemente agilizaría y daría más potencia a su marcha. Los huesos de la cabeza eran gruesos, e incluso a veces con un cuerno, lo que posiblemente les daba una ventaja a la hora de competir por la comida o el apareamiento. Todos los dinocéfalos se caracterizaban por tener incisivos entrelazados, permitiendo un ajuste más cortante entre los dientes superiores e inferiores. La alimentación era variada, pudiendo ser carnívoros, herbívoros u omnívoros.



El camino de los terápsidos (A partir de Wikimedia, GFDL 1.2)

El siguiente paso en la serie fósil nos lleva a los ***gorgonópsidos***, los "*cara de Gorgona*" -terrible monstruo femenino-, de efímera vida ya que desaparecieron a finales del Pérmico, de los que diremos que pudieran haber sido los primeros animales con sangre caliente. A su lado se desarrollaban los ***dicinodontos***, los "*doble diente de perro*", con un potente esqueleto de huesos cortos y robustos.



Representación artística del cinodonto Oligokyphus (Wikimedia, GFDL 1.2)

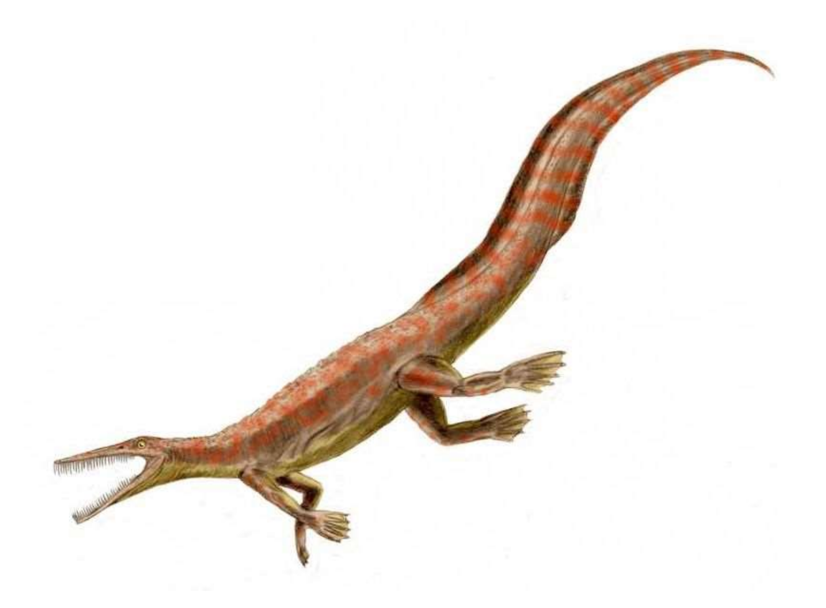
Hacia finales del periodo, hace 260 millones de años, estos últimos dieron paso a los ***cinodontos***, los "*dientes de perro*", aún reptiles mamiferoides, de los que definitivamente evolucionaron a finales del período Triásico, hace unos 200 millones de años, los primeros mamíferos, tras haber ido recogiendo los cambios evolutivos de sus ancestros.

Andaban ya más erguidos que los reptiles, con sus patas en posición más ventral. En su evolución se observa cómo van perdiendo el número de huesos que conforman la mandíbula inferior, y cómo el cráneo se va reforzando en aquellos puntos que servían de soporte a un músculo facial masticador cada vez más potente. Los dientes se iban especializando, de forma que no sólo cogía y desgarraba la presa para tragarla, sino que comenzó a masticar, lo que facilitaría la digestión y mejoraría la eficiencia alimentaria. En su mandíbula superior se aprecian ya agujeros que bien podían ser el paso de nervios y vasos sanguíneos que actuaban sobre la musculatura facial, característica exclusiva de los modernos mamíferos. Disponía ya de un segundo paladar, el que separaba los conductos olfativos de la boca, con lo que podía comer y respirar a la vez. Los huesos que va perdiendo en la mandíbula inferior se van utilizando para mejorar la audición, habilidad que le obligaba a tratar un mayor número de datos externos y por tanto a favorecer una coevolución de su cerebro. Es probable que fueran, al menos parcialmente, animales de sangre caliente ya que empiezan a observarse cubiertas de pelo que les habrían ayudado a mantener la temperatura.

Todos estos cambios iniciales tienen su consolidación en los futuros mamíferos. Trataremos de ello en algún capítulo correspondiente al periodo Jurásico.

Volviendo a la otra rama de reptiles, los **saurópsidos**, hay que comentar que a mediados del Pérmico ya se observan anápsidos primitivos mientras que hay que esperar al final del periodo para que aparecieran los diápsidos.

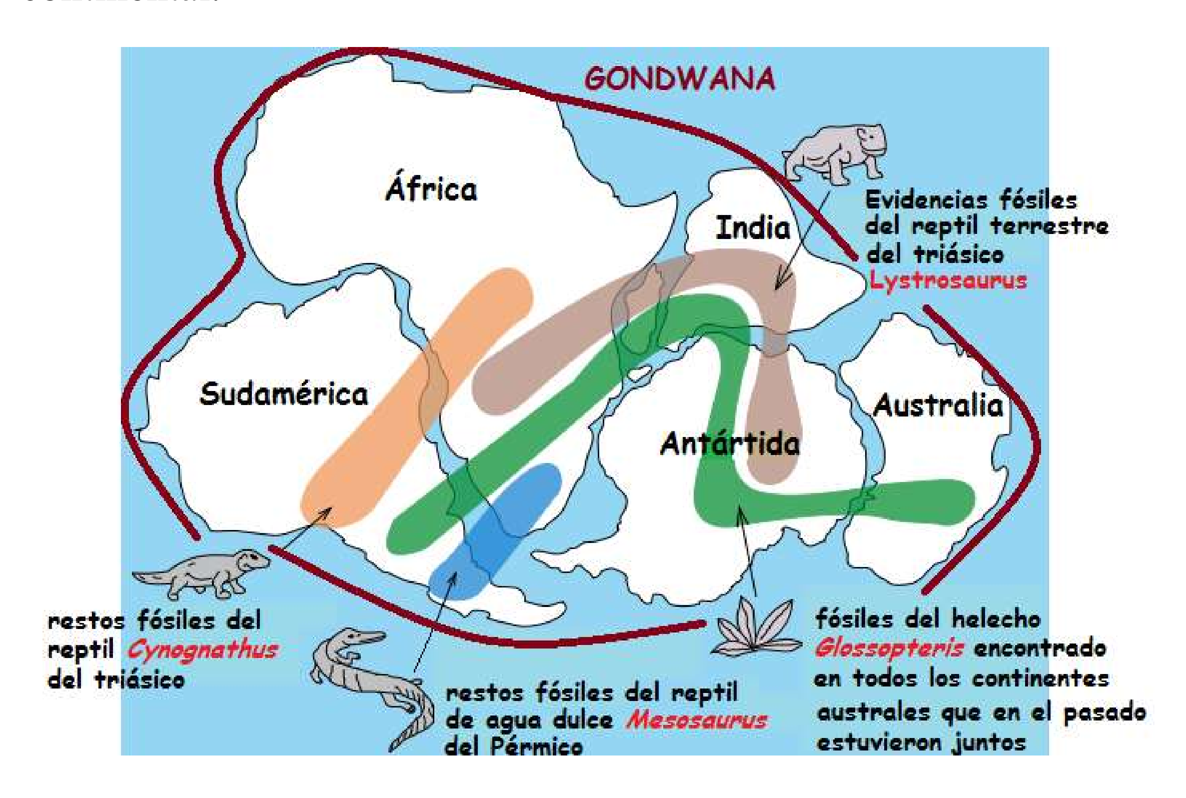
Antes de acabar con el cuadro de los reptiles, merece la pena hacer mención sobre uno de ellos que, después de salir a tierra, volvió al medio acuático, como harían más tarde las ballenas o las focas, donde cazaba peces pequeños y otros animales acuáticos. Fue el primero reptil que lo hizo. Se trata de *Mesosaurus,* posiblemente de la familia de los anápsidos, que tenía una constitución esbelta y una forma alargada, lo que se traducía en una buena hidrodinámica que le permitía nadar a gran velocidad. Además, las patas terminaban en manos palmeadas que tenían función de remo. La cola era estrecha y larga, perfectamente adaptada para sus necesidades, y tal vez contase con una aleta.



Mesosaurus (Wikimedia, GFDL 1.2)

¿Y por qué hago una mención especial a este reptil? Porque hay que agradecer a Mesosaurus, conjuntamente con la genialidad de pensamiento del científico alemán Alfred Wegener, el que en 1911 se planteara la teoría de la deriva continental. Wegener observó que pequeños fósiles pertenecientes a un reptil de agua dulce se repetían en rocas del Pérmico en localidades tan distantes hoy en día como Brasil y Sudáfrica, pero en ninguna otra parte del mundo. Este dato le hizo sospechar que tal vez estos territorios hubieran estado ligados en un pasado remoto. Cuando consiguió reunir otras pruebas,

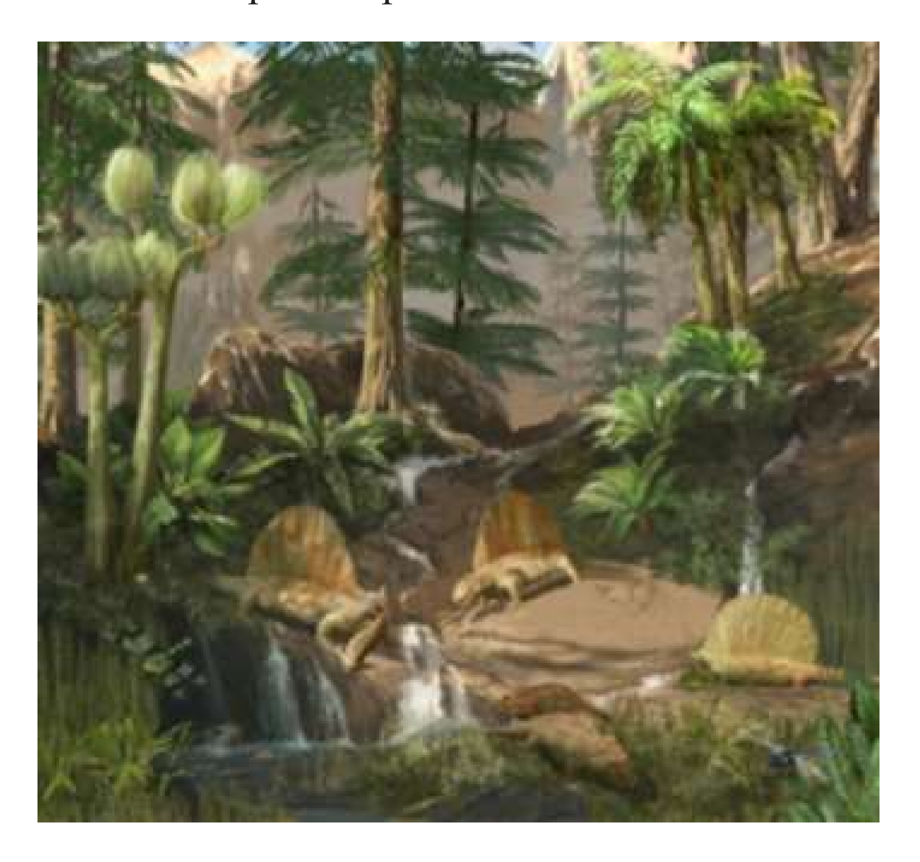
Wegener expuso al mundo científico su teoría sobre la deriva continental.



La "iluminación" de Wegener sobre el antiguo perfil de Gondwana (Wikimedia, dominio público)

La sospecha se había iniciado al comprobar que los perfiles de los continentes actuales parecían encajar unos con otros, a pesar de que les separasen grandes masas oceánicas. Por ejemplo, el golfo de Guinea en la costa oeste de África encaja perfectamente con la tripa panzuda de Brasil. Al hacer el ejercicio de completar el rompecabezas observó también que existían cordilleras con la misma edad y la misma clase de rocas en distintos continentes que, según él, habían estado unidos. E incluso pasaba lo mismo con depósitos de carbón o morrenas de glaciares que se repetían a uno y otro lado del mar. Y aún hay más. Las pistas que dejaban los fósiles, entre los que se encontraban los de algunos animales terrestres tales como reptiles -aquí entra el *Mesosaurus*- o los de algunas plantas, que por sí solos hubieran sido incapaces de haber atravesado océanos, apuntaban hacia estos mismos patrones.

Eran tales las evidencias que no dudó en plantear que durante el periodo de vida de estas especies había existido un único continente, unión de todas las tierras. Si habían estado unidas y ahora estaban separadas sólo cabía la posibilidad de que se hubiera comportado como un ensamblaje de balsas pétreas navegando a la deriva. Más tarde, con el desarrollo de los estudios paleomagnéticos (sobre la orientación de las moléculas de minerales ferromagnéticos, cristalizadas según la orientación del eje magnético terrestre en el momento de su solidificación) se remachó la comprensión del mecanismo de la deriva de placas continentales, siendo hoy una teoría científica más que comprobada.



Concepción artística de lo que pudo ser una escena en el periodo Pérmico (Foto: Sam Noble Museum of Natural History, Oklahoma, fair use)

A pesar de los grandes movimientos geológicos, el mundo parecía idílico después de haber soportado la tensión provocada por Pangea. La ilustración anterior permite relajar nuestros ojos sobre un paisaje

fluvial de finales del Pérmico, donde los bosque de coníferas y helechos con semilla dan cobijo a unos pelicosauros con la vela expuesta al sol, que se alimentan de los peces que consiguen capturar. En el centro de la imagen unos dicinodontes esperan su oportunidad. Un nuevo amanecer con el sol pintando las primeras luces sobre las cúspides. Un día más como cualquier otro de los ya vividos.

Y de pronto, empezó el Armagedón. El misterio se desvelará en el siguiente capítulo.

38. La gran extinción del Pérmico-Triásico

En el capítulo anterior contemplábamos en todo su esplendor cómo durante el periodo Pérmico asentaban sus bases aquellos que más tarde, a lo largo del Mesozoico, dominarán la escena, al menos de forma más aparente y mediática: los reptiles y los mamíferos. No lo tuvieron fácil.

Nada ni nadie se podía imaginar la que se avecinaba. Aquel día, un día cualquiera durante el Pérmico, había amanecido igual de caluroso y seco, como venía sucediendo desde hacía unos millones de años. Aquel día iba a comenzar la cadena de sucesos que estrangularían la vida hasta posiciones próximas a la desaparición. Fueron entre 5 y 10 millones de años terribles -incluso algunos lo estrechan a tan sólo un millón y medio- que cambiaron la faz de la Tierra.

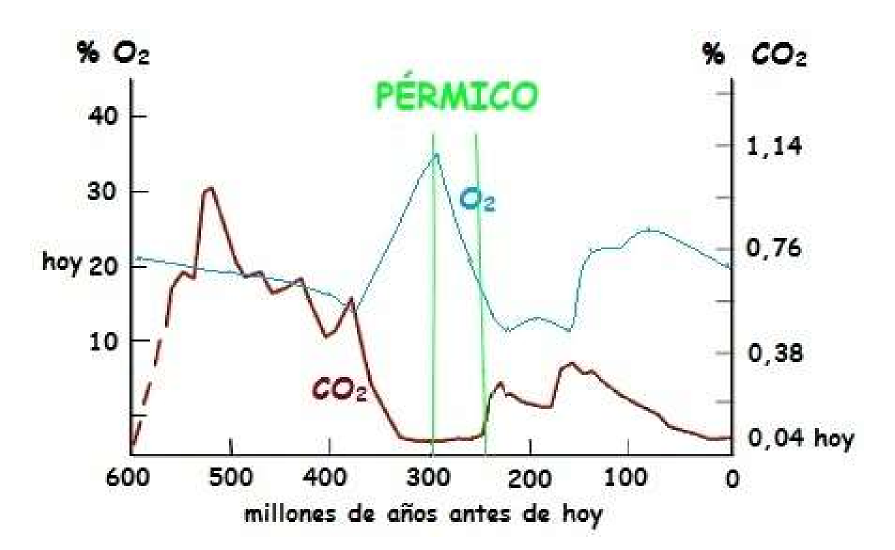
El resultado lo evidencian los datos paleontológicos disponibles, que nos permiten asegurar que el 96% de las especies marinas del Pérmico desaparecieron hace 251 millones de años, en el límite entre el Pérmico y el Triásico. Desaparecieron para siempre los trilobites, mientras que los corales rugosos, que tanto habían colaborado en la construcción de los arrecifes, fueron brutalmente diezmados. Menguaron las especies de los amonites, braquiópodos y equinodermos. Deberíamos esperar diez millones de años a que la recolonización de los medios marinos volviera a activarse.

En cuanto a la fauna de tierra firme, se estima que desaparecieron un 77% de los vertebrados, con una mayor supervivencia entre los de pequeña talla.

Las plantas soportaron mejor la crisis, aunque los helechos con semilla se extinguieron y a las gimnospermas les costó un largo periodo el poder reaparecer. Lo consiguieron gracias a la capacidad de sus semillas para enquistar la vida hasta encontrar condiciones más propicias. No se generó carbón durante el periodo, a diferencia de lo ocurrido a lo largo del Carbonífero, lo que hace pensar que la práctica totalidad de las plantas turberas desaparecieron.

Una evidencia de la crisis de los bosques la encontramos en la proliferación de restos fósiles del *Reduviasporonites* durante el momento en el que se da la extinción. El análisis de la firma geoquímica del mismo indica que se trata de un hongo cuyo nicho ambiental era la madera en descomposición.[1] Las piezas encajan para indicar que los bosques de Pangea fueron aniquilados por la extinción masiva, encontrando este hongo un entorno idóneo para su desarrollo.

El hecho fue tan importante que se establece este evento como el que marca el final del Paleozoico, cuyo nombre significa con mucha precisión "*vida antigua*". Después de él vendría la vida nueva del Mesozoico, la "*vida intermedia*".



Ya se ha comentado en el capítulo 36 que la forma y posición geográfica de Pangea había provocado un progresivo calentamiento, de forma que los bosques tropicales se constriñeron al cinturón

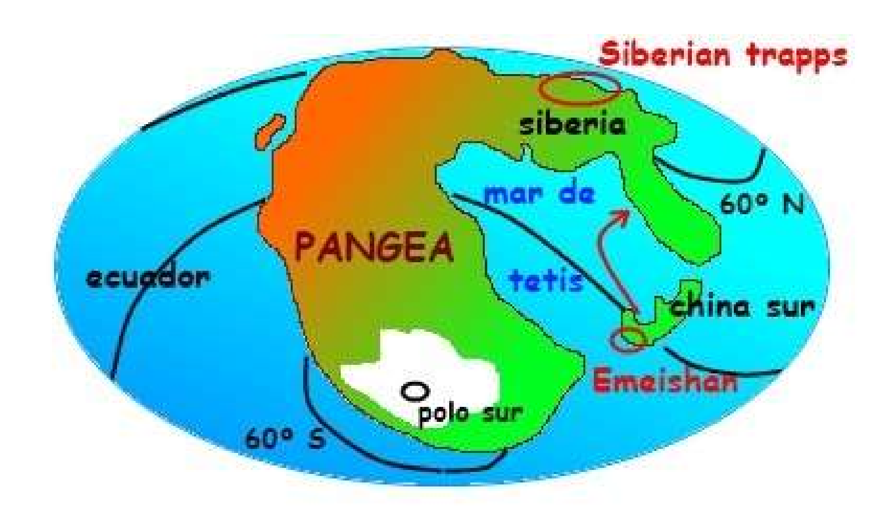
litoral del mar de Tetis. Esta circunstancia ralentizó en las plantas verdes su exuberante función clorofílica del Carbonífero, lo que a su vez arrastró una disminución del O_2 atmosférico.

En la figura anterior se observa esta caída durante el Pérmico, que influyó también en el grado de oxigenación de las aguas. La presencia de oxígeno atmosférico, que había llegado al 35% a finales del Carbonífero, descendió paulatinamente durante todo el periodo, de forma que cuando ocurrió la extinción era del 16%, un poco menor que el actual 21%. Este nivel no era un inconveniente para la vida en sí, ya que la cantidad absoluta de oxígeno en aquellos momentos corresponde al que hay en la actualidad a una altura de unos 3.000 metros sobre el nivel del mar, donde no hay problemas para la subsistencia. No obstante, la biosfera iba en camino hacia un mayor estrés térmico y oxigénico, sobre todo en las calientes aguas del mar que, al soportar una menor presión de vapor de oxígeno en su superficie, disolverían una menor cantidad de este gas.

Corrían estos tiempos, hace 260 millones de años, cuando comenzó un día a alterarse el mar próximo a la costa, en una zona cercana a lo que ahora es la provincia china de Emeishan. Manchas blanquecinas y verdosas teñían sus aguas, mientras que turbios remolinos iban agitando las olas. Animales muertos flotando y olor a sulfhídrico que alejaría del litoral a los que vivían en tierra firme.

Posiblemente la deriva del pequeño continente de China Sur hacia el norte hizo que la franja de choque con la placa del mar de Tetis se fragmentara y agrietara, dejando paso libre al magma. En esta franja de posición ecuatorial se habían estado acumulando en los últimos cien millones de años capas y capas de carbón.

Inicialmente emergieron unas columnas tremendas de vapor de agua, cada vez en mayor número y volumen, que llenarían la zona de espesas y calientes nubes, hasta un punto de no retorno en que las tensiones de los bordes de las grietas no pudieron contener la presión del magma, y reventó.



Situación geográfica sobre el mapa de Pangea pérmico de los dos eventos volcánicos que iniciaron la extinción masiva de hace 251 millones de años. Sobre el mar de Tetis una flecha roja indica la deriva continental del subcontinente China Sur.

Toneladas de material candente, que se estima en un millón de kilómetros cúbicos de lava, se pusieron en contacto con el agua del mar, produciendo una evaporación masiva que duró tan sólo unos pocos miles de años. Millones de metros cúbicos de CO_2, ClH y SO_2 fueron lanzados a la atmósfera. Por poner unos números que nos hagan percibir la magnitud de las emisiones, entraron en la atmósfera 170 trillones de toneladas de dióxido de carbono y 18 trillones de toneladas de ácido clorhídrico. El cielo, cubierto de espesas nubes durante muchos años, no permitía el paso de la vital luz solar, a la vez que un torrente de lluvia ácida drenaba la atmósfera de los gases de los volcanes. El paso del magma a través de los depósitos de carbón produjo aún más CO_2 y metano del que la propia erupción volcánica arrastraba. Como consecuencia, se incrementó el efecto invernadero y la temperatura de la Tierra subió aún más.

Se sabe que debió pasar algo así gracias al estudio de las rocas de aquel momento. Presentan una atípica desviación al alza en la relación de los isótopos del carbono $^{12}C/^{13}C$, que llegó a un máximo del 42 ‰ a finales del Pérmico. Los seres vivos metabolizan mejor

el carbono 12, ya que para ello se precisa el empleo de menos energía que con el carbono 13, simplemente por tener una menor masa atómica. En ellos, por tanto, la relación entre ambos isótopos -$^{12}C/^{13}C$- es superior que en el resto de la naturaleza. El hecho de que en las rocas de finales del Pérmico se observe una alteración del ciclo del carbono terrestre indica que en aquel momento se estaba liberando mucho carbono de origen orgánico, lo que corrobora el episodio volcánico a través de los depósitos de carbón.

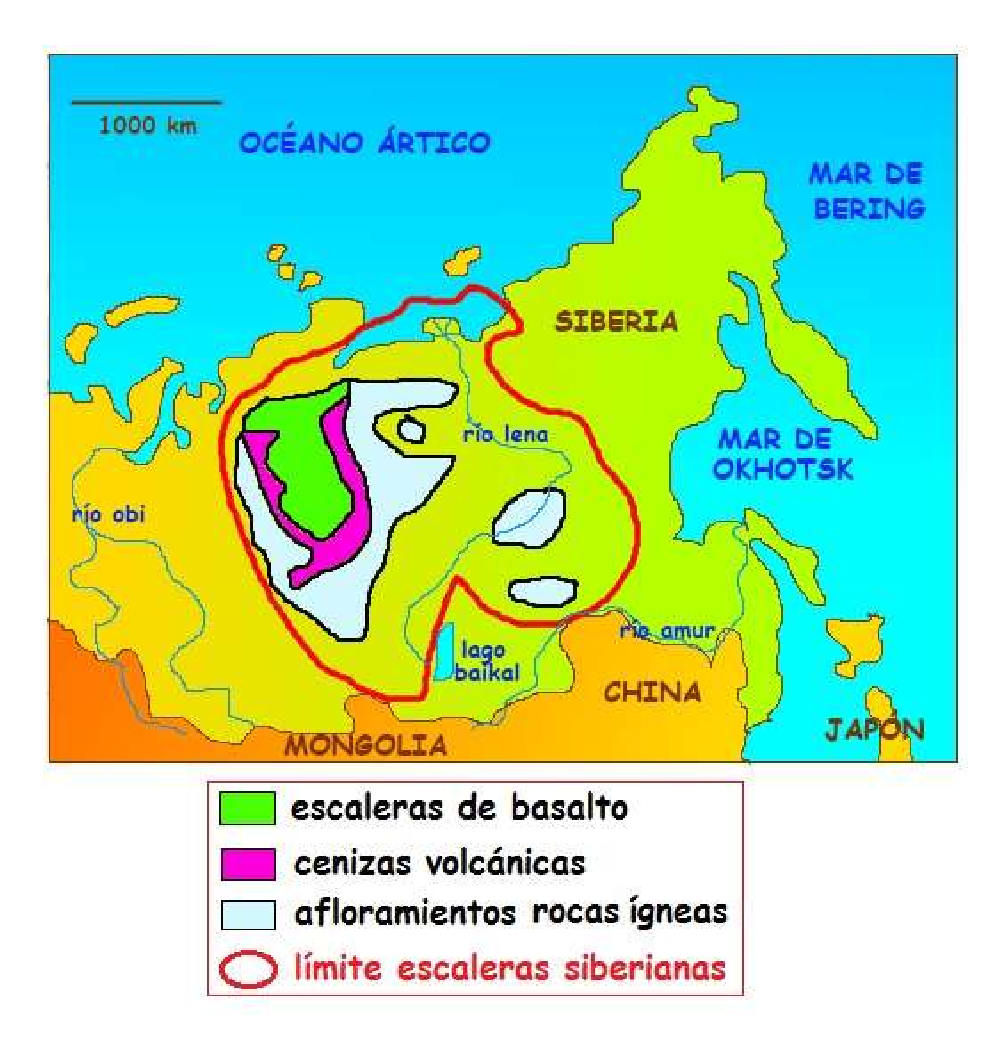
La capa de roca que se fosilizó después de la erupción muestra la extinción de diferentes tipos de vida, lo cual vincula claramente esa actividad volcánica con una importante catástrofe ambiental.

El incremento de las temperaturas y la disminución del oxígeno atmosférico provocaron también una mayor disminución del contenido de este gas en las aguas, en las que ya empezaron a dominar las bacterias que metabolizaban azufre en la diaria competencia con los organismos de metabolismo aeróbico. El resultado fue el incremento de la concentración de sulfhídrico, acidificando las aguas.

Otro tipo de bacterias, las árqueas metanógenas *Methanosarcina*, colaboraron también al incremento del efecto invernadero y en la acidificación de los mares. Se ha observado una gran proliferación de las mismas en los momentos anteriores a la extinción. La teoría [2] explica que a finales del Pérmico se tiene la evidencia de que estos organismos adquirieron nuevos genes por transmisión horizontal a partir de otros microbios. Estos genes aumentaron su capacidad de absorber el carbono orgánico existente en el agua y por tanto espolearon su función generadora de metano. El efecto invernadero se incrementó en el planeta, pero además la absorción de este metano por las aguas incrementó en las mismas el nivel de dióxido de carbono disuelto, añadiendo un nuevo vector de acidificación.

Realmente la naturaleza vivía tiempos difíciles, aunque lo iba soportando en el filo de la inestabilidad. Pero fue en vano, ya que

entre unos cinco y diez millones de años después se produjo otra crisis volcánica aun de mayores proporciones, que duró aproximadamente un millón de años, y en la que muchos animales pudieron desaparecer en apenas unos cincuenta mil años, con la mortandad disparándose masivamente a partir de un periodo radiodatado en hace 251 millones de años.



Zona de influencia de las Siberian trapps sobre un mapa actual

El lugar: en el borde septentrional de Pangea, en tierras que ahora son parte de Siberia. No se trató de una gran explosión, sino de la efusión rápida de grandes cantidades de lava caliente y poco viscosa a lo largo del siguiente millón de años. Por las formas características que forma la lava al solidificarse en estos casos, que recuerdan a una escalera, se denominan con la palabra sueca *trapp* (que significa eso

mismo, escalera). Y por eso a esta enorme erupción se la conoce en todo el mundo como *siberian trapps* que a veces se ve erróneamente traducido al castellano como *trampas siberianas,* pero en realidad quiere decir *escaleras siberianas*.

Se estima que la erupción proyectó entre uno y cuatro millones de kilómetros cúbicos de lava basáltica, cubriendo unos siete millones de kilómetros cuadrados de terreno (por comparar, la totalidad de Europa es de 10 millones de km^2), y al igual que había sucedido en el episodio de Emeishan, emitió a la atmósfera una cantidad aún indeterminada, pero extraordinariamente grande, de gases de efecto invernadero entre los que se encontraba el CO_2 y el metano. El clima de la Tierra dio una vuelta de tuerca más hacia una mayor sequía y calor. Se estima que tras esta segunda erupción la temperatura media subió unos cinco grados centígrados.

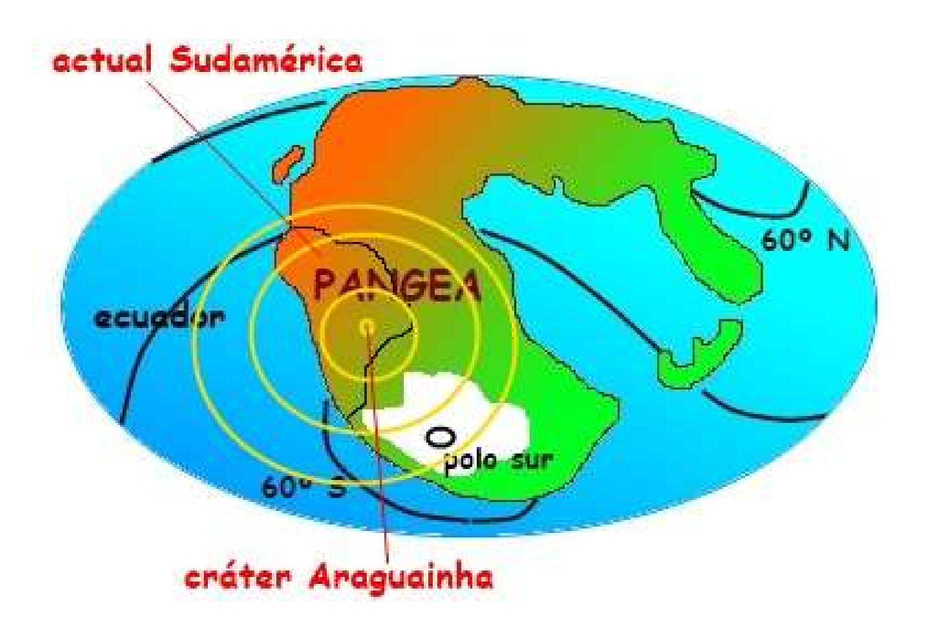
La mayor temperatura produjo un par de efectos combinados. Por un lado, favoreció la autocombustión de grandes masas de carbón que se habían generado desde el Carbonífero. Esto aún produjo más CO_2 y disminuyó aún más la concentración de oxígeno en la atmósfera, que llegó a ser del 16%. Las aguas de los mares se calentaron, liberando los depósitos de metano congelado próximos a la costa, con lo que se incrementó aún más el efecto invernadero, lo que reforzó aún más la desviación del carbono hacia su isótopo 12, como realmente se observa.

La acidificación de los mares que se venía arrastrando desde el episodio Emeshian por el incremento del CO_2, con este segundo golpe, más súbito, intenso y prolongado que el primero, debió ser brutal. Duró unos 10.000 años según se ha podido comprobar estudiando rocas de aquellos fondos marinos que actualmente están al descubierto en los Emiratos Árabes Unidos.[3]

Inmensas extensiones de bosques ardieron bajo el empuje de la lava, generando una capa de nubes asfixiantes repletas de cenizas que, al depositarse en el suelo, ahogaron aún más a la vida.

Con el calor, la anoxia oceánica se agravó, lo cual hizo que las bacterias sulfurosas prosperaran con mayor facilidad en las aguas, con su metabolismo generando grandes cantidades de sulfuro de hidrógeno que se iba liberando a la atmósfera. Las costas se volvieron inhabitables e incluso pudo afectar a la capa de ozono.

Como vemos, realmente se había producido a lo largo de unos pocos millones de años una sucesión de **fenómenos en avalancha** sobre una naturaleza ya estresada. Seguramente resultó activado inicialmente por la erupción de las escaleras siberianas, pero que se amplificó enormemente debido a las otras circunstancias que hemos comentado.



Situación del impacto que produjo el cráter de Araguainha sobre el mapa de Pangea durante el Pérmico. Como ayuda visual se ha dibujado el perfil del actual territorio de Sudamérica.

Se ha especulado mucho sobre si realmente la extinción pudo verse reforzada por la caída de un meteorito, tal como veremos que sucedió con la desaparición de los dinosaurios y otra fauna y flora hace unos 65 millones de años. Parece claro que no hubo un evento de este estilo con influencia de alcance planetario. Sin embargo, recientemente se ha podido constatar la existencia de un paleocráter de 40 kilómetros de diámetro (cuatro veces y media inferior al

producido por el mencionado meteorito que aniquiló a los dinosaurios) en la frontera de los estados de Mato Grosso y Goiás en Brasil, llamado el cráter Araguainha.[4] La radiometría data el cráter en la misma época en que se producía la extinción supermasiva del Pérmico-Triásico. No obstante, dado el tamaño del meteorito se estima que la energía liberada en el impacto no pudo tener efectos a nivel planetario. Pero evidentemente debió ser la puntilla durante esta época apocalíptica.

También se especula con la posibilidad de que otro choque de un meteorito pudiera iniciar el episodio de las Siberian trapps. En la Tierra de Wilkes, en la Antártida, se encuentra un cráter de impacto de unos 500 kilómetros de diámetro: ¡no fue una bagatela! El problema es que su datación en el tiempo no es muy precisa, aunque se cree que cayó hace unos 260 millones de años. Si esto fuera así, coincidió en la época del inicio de la gran mortandad. Los científicos que lo han descubierto especulan[4] con la posibilidad de que las ondas sísmicas inducidas en el choque afectaron las antípodas del punto de impacto, lugar donde en aquel momento se situaba la actual Siberia. ¿Pudo ser el gatillo que disparó el largo episodio de masivo vulcanismo en aquel territorio?

Y hasta aquí esta triste historia, la de la tercera y más catastrófica extinción del Fanerozoico. Aunque mientras respirara una pequeña chispa de vida, mientras fuera posible la existencia de un abrigo en donde refugiarse y resistir, habría que pensar que quedaba espacio para la esperanza. Y así fue. Podemos imaginar a algún superviviente, asustado, hambriento, mirando por la estrecha rendija de su madriguera que le protegería de las cenizas y los vientos huracanados y calientes, observando un terrible mundo en negro y rojo. Pero a la vez fuerte, hábil, valiente y dispuesto a seguir adelante… ¡qué remedio! El riesgo fue modelando sus hábitos, y acertó, porque poco a poco fue resarcido por la inclemente naturaleza. Su prole logró proseguir en el laberinto del fuego.

Sobre la infernal tierra de finales del Pérmico e inicios del Triásico, la vida se mantuvo. La escasa vida que daría apelativo a la siguiente era, el Mesozoico, sugerente nombre que proviene del griego *meso/μεσο*, que significa "entre", y *zoon/ζωον*, que significa "animal". La vida intermedia entre la tragicomedia iniciada en el Cámbrico y el juvenil avanzar del Terciario/Cuaternario por donde mucho más tarde nos íbamos a mover los humanos. En el próximo capítulo iniciaremos el relato de la recuperación.

NOTAS DEL CAPÍTULO 38:

1. Podéis leer la información más de detalle en esta entrada, "*Reduviasporonites - Ancient Fungus Shows World Forests Were Once Wiped Out*" (octubre 2009), de la web Science 2.0.
2. "*Ancient whodunit may be solved: The microbes did it!",* David L. Chandler (marzo 2014).
3. "*Ocean acidification and the Permo-Triassic mass extinction*", M. O. Clarkson et al. Una mayor información en esta publicación de la revista Science de abril de 2015.
4. "*Geochronological constraints on the age of a Permo–Triassic impact event: U–Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ results for the 40 km Araguainha structure of central Brazil*", E. Tohver (junio 2012).
5. En este artículo encontráis una descripción del impacto de Wilkes Land: "*GRACE gravity evidence for an impact basin in Wilkes Land, Antarctica*", Ralph R. B. von Frese et al. (febrero 2009).

39. Periodo Triásico

En el anterior capítulo habíamos dejado a nuestra querida biosfera un tanto deteriorada, por decirlo de una forma suave. Sobre nuestro planeta habían cabalgado los cuatro jinetes del Apocalipsis. Más del 90% de las especies marinas desaparecidas. En tierra se habían ido para no volver jamás del 70% de las especies animales. Las plantas habían resistido un poco más, aunque también quedó muy limitada su presencia. No obstante, dejábamos el capítulo anterior con una pincelada esperanzadora puesta sobre algún pequeño animal que, como los galos de Astérix, supiera resistir el ambiente más hostil que había existido desde los infernales años del Hadeico.

La gran mortandad es el hito biogeológico frontera entre el Paleozoico y el Mesozoico, entre los periodos Pérmico y el que recién nos disponemos a estrenar: El Triásico. Este se extendió en una franja temporal entre hace 251 y 200 millones de años.



Como hemos comentado, comienza el Mesozoico o Edad de los Reptiles. Su primer periodo, el Triásico -del latín *tria,* que significa "tríada", grupo de tres-, fue así nombrado en 1834 por Friedrich Von Alberti para hacer honor a los tres tramos más generales de depósitos sedimentarios de este periodo que suelen aparecer juntos.

Durante todo el Triásico se mantuvo Pangea unida, lo que supuso una continuación del clima árido del Pérmico. A mediados del periodo comienzan a consolidarse los dinosaurios, y a finales

aparecen los primeros mamíferos verdaderos. Había comenzado tras una catástrofe de extinción masiva y finalizará de la misma manera.

Retomemos por un momento las imágenes dejadas a finales del Pérmico: el mundo cubierto de cenizas, el fuego de las lavas rodeando a la Vida, los asfixiantes gases volcánicos que dificultaban hasta grados extremos la respiración… pocos lugares se escapaban del extremo estrés que este escenario produciría. En el mar, prácticamente se partía de cero. En tierra la situación era menos mala aunque, sin lugar a dudas, muy crítica.

Las más que adversas condiciones tras las extinciones se prolongaron durante muchos años. Las inestabilidades habían hecho acto de presencia, lo que impulsaba continuos y reiterados desequilibrios en los ciclos del carbono, del oxígeno, en los ciclos de calentamiento/enfriamiento y en otros factores geofísicos. Los ecosistemas se iban recuperando y degradando al hilo de estos desequilibrios, lo que afectaba de igual manera a las especies que habitaban en ellos. Parecía que se restablecían y al poco volvían a menguar. Cinco millones de años se necesitaron para que se normalizara el medio ambiente de forma que pudieran recuperarse los ecosistemas y conseguir un régimen más estable. Tras este punto de inflexión la Vida volvió a ser sostenible.

No es difícil hacer un ejercicio de imaginación y transportar nuestra propia existencia a aquellos días, en un intento de empatizar con las pocas especies que sobrevivían malamente ¿Cómo lo harían? ¿Cómo lo hubiéramos hecho nosotros, imaginarios retroviajeros de la máquina del tiempo?

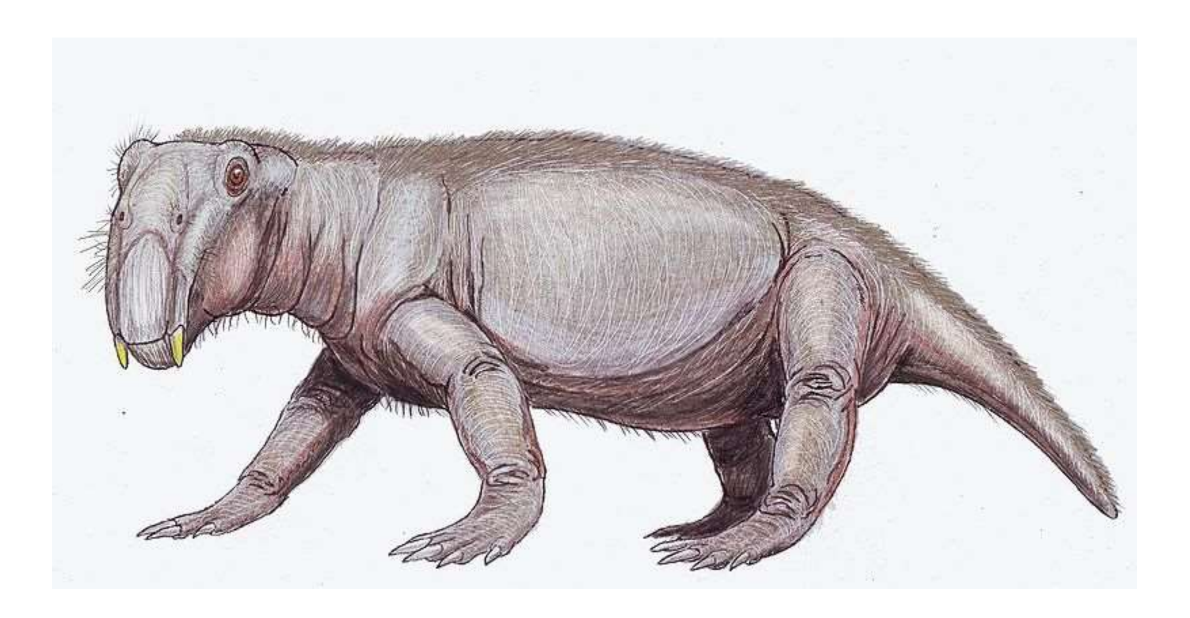
Ante todo habría que protegerse frente a las inclemencias del tiempo, tarea que dependía de nuestra habilidad e imaginación. Segundo, habría que acomodar en gran manera los patrones de alimentación. En tercer lugar habría que ponerse en manos del destino evolutivo y esperar que nuestro organismo fuera conducido exitosamente por la selección natural.

"¿Quién pudo sobrevivir? La respuesta, curiosamente, fue muy parecida tanto en el mar como en tierra: aquellos que fueran los mejores respirando, aquellos que pudieran aguantar bajos niveles de oxígeno, sofocantes tasas de dióxido de carbono y una sucia mezcla de gases tóxicos. Aquellos que podían jadear y respirar a la vez, que se movían y permanecían activos, los que vivían en agujeros, en madrigueras, en el lodo, en las marismas, en sedimentos, aquellos que buscaban su comida en lugares donde nadie lo quería hacer.

Algunos pocos animales lo consiguieron, y gracias a ellos estamos nosotros aquí. Y por ello es significativo el que los primeros animales terrestres que recuperaron la naturaleza tras la Gran Mortandad fueran los Lystrosauros" -de la familia mencionada en el capítulo 36, los terápsidos dicinodontes-, *"horadadores de madrigueras, de fuerte pecho con forma de barril, diafragma muscular, paladar óseo, amplios conductos para el aire con cornetes refrigeradores. Emergieron resoplando y jadeantes de sus enrarecidas madrigueras para colonizar los continentes vacíos como si fueran prolíficas ardillas".*

¡Qué imagen más vívida del momento nos dejó el bioquímico y escritor inglés Nick Lane en su libro "*Life Ascending*!"

El *Lystrosauro* es famoso porque habitó de forma dominante, y por unos cuantos millones de años, el sur de Pangea. Por lo menos una especie del género, posiblemente la menos especializada, sobrevivió a la extinción masiva del Pérmico-Triásico y, en ausencia de depredadores y de competidores por el alimento, prosperó y fue el ancestro a partir del cual se diversificaron varias especies dentro de su género, de forma que resultó ser el grupo más común de vertebrados a lo largo del Triásico temprano, durante el cual el 95% de los vertebrados terrestres fueron listrosaurios. Las causas nos las ha explicado muy bien Nick Lane.



Representación artística de nuestro héroe Lystrosaurus georgi (Wikimedia, GFDL 1.2)

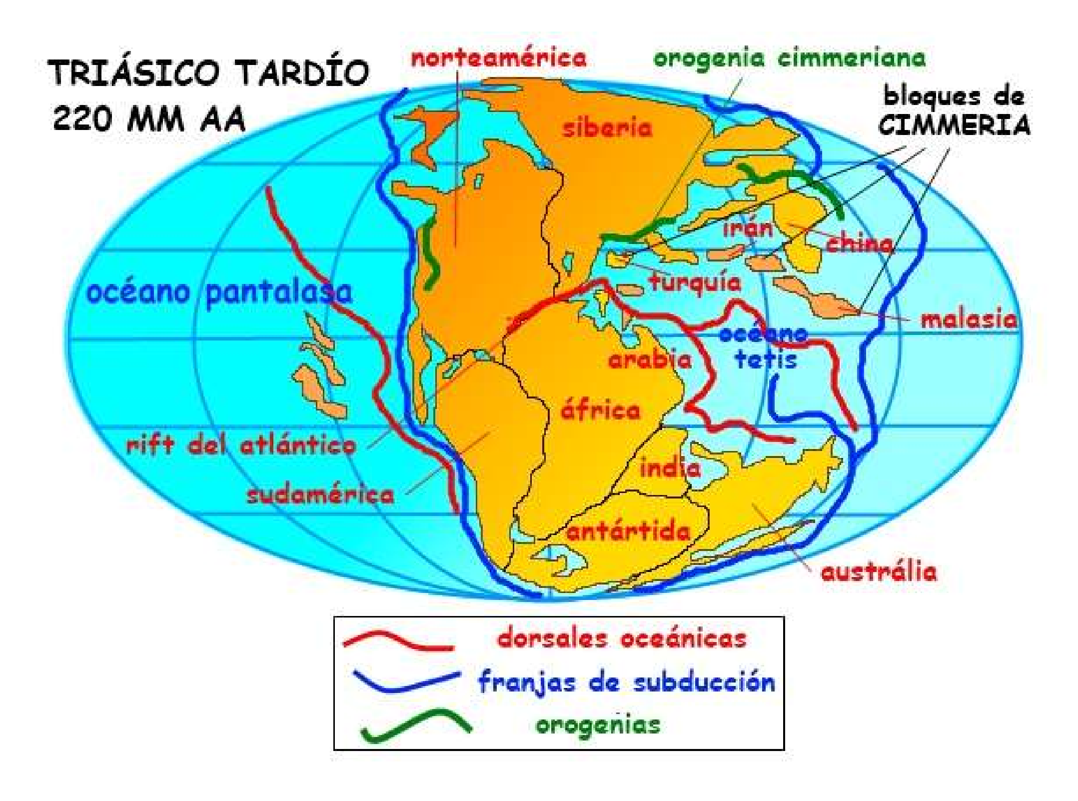
Desde el fondo de un agujero, protegidos del calor, de la acidez de las lluvias contrastando con la aridez y alto pH de las cenizas, adaptando su metabolismo tanto a la actividad diurna como a la nocturna, lo que le permitía más autonomía y radio de acción a la hora de buscar el alimento, encaminándose poco a poco hacia el magnífico subproducto llamado *sangre caliente*. Desde el fondo de la madriguera la Vida retomó el protagonismo con extremas dificultades.

¿Cuál fue el escenario climático que se encontró?

Recordemos que, como resultado de los geológicamente convulsos sucesos de fines del Pérmico, los niveles de CO_2 eran unas seis veces superiores a los actuales, lo que implicaba un efecto invernadero potente y elevadas temperaturas. El oxígeno, por el contrario, se situaba en el entorno del 16%, muy inferior al 21% actual. Podemos decir que el ambiente general climático de la Tierra era cálido y seco, con matices, resultado de la especial distribución de tierras y mares.

Si observamos el mapa posterior vemos que la Tierra se agrupaba prácticamente en un sólo continente, Pangea, como un anillo que

rodea un mar interior, Tetis, y que es rodeado a su vez por un inmenso océano, Pantalasa. Bajo las costas de Pantalasa se subducían las placas oceánicas.



Pangea durante el Triásico tardío. Se ha sobreimpreso los perfiles de los actuales territorios.

En el mar de Tetis el fenómeno era menos intenso, a pesar de que se estaban activando las dorsales oceánicas que comenzaban a introducirse en pleno continente, iniciando un rift, una gran brecha, que a finales del periodo sería el inicio de la desintegración de Pangea, en norte y sur, y que más tarde formaría el moderno océano Atlántico central. El océano de Tetis estaba siendo barrido casi horizontalmente, de sur a norte, por el continente lineal de Cimmeria (una larga franja que hoy corresponde a la comprendida entre Turquía y Malasia), que se había desgajado de las costas sur de Tetis e iba a llegar a colisionar sobre las costas del norte, presionando sobre Eurasia en donde se generaron diversas orogénias. Los niveles de los mares eran bajos con relación a lo que iba a venir en un futuro, a pesar del deshielo de los glaciares de Gondwana.

Las tierras emergidas eran muy extensas, y su amplitud sobre el círculo del ecuador se aproximaba a los siete mil kilómetros. Las distancias al mar eran inmensas. Esto hacía que la influencia que ejercen las masas de agua amortiguando las variaciones de temperaturas fuera mínima, lo que se traducía en un clima altamente estacional, con veranos e inviernos extremos. La lejanía del mar creaba condiciones de intensa aridez, aunque en el entorno de algunos lagos interiores posiblemente se mitigara la sequía y las temperaturas fueran más suaves.

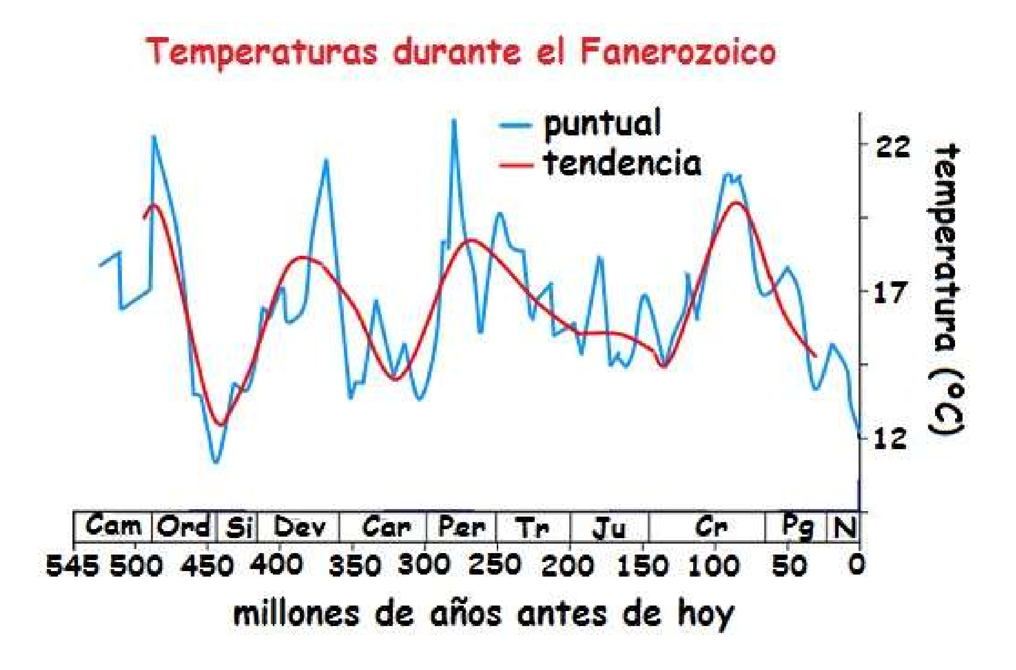
Hay estudios basados en las relaciones isotópicas del oxígeno en fósiles de conodontos que parecen establecer que las temperaturas en aquel momento eran extremas: La superficial oceánica en los trópicos podía ser de 40ºC y en las zonas tropicales emergidas de 50 a 60ºC.

En la franja ecuatotropical, debido a las diferentes inercias térmicas de agua y tierra, la desigualdad de temperaturas entre aguas oceánicas y zonas del interior provocaría fuertes vientos que arrastrarían masas de aire saturado de humedad marina. Y al igual que pasó en el Pérmico, la inexistencia de grandes montañas que favorecieran la formación de nubes disminuyó en gran manera la fuerza de las lluvias, que no lograban penetrar hasta lo más profundo del continente. Estas circunstancias hicieron que incluso en estas zonas ecuatoriales y tropicales, donde se hubiera esperado la existencia de bosques monzónicos, abundaban los desiertos y los bosques secos tropicales.

Las temperaturas extremas de los veranos extendieron un ambiente cálido sobre las regiones polares, en las que posiblemente pudo afianzarse con mayor probabilidad de éxito la vida animal y vegetal.

De todas formas, se debe completar el encuadre climático diciendo que, a pesar de que las circunstancias paleoclimáticas aseguraban unas temperaturas extremas y cálidas, la tendencia, que seguiría en

el Jurásico e inicios del Cretácico, fue hacia la disminución de las temperaturas medias.



La biota del Triásico

En la franja tropical del planeta no había animales terrestres complejos porque su metabolismo les hacía imposible sobrevivir en las condiciones de extrema temperatura. En esas regiones tampoco había peces o reptiles marinos, sólo había algunos moluscos. Se extendía una gran zona muerta a lo largo del planeta. Las escasas especies de animales vivían en las regiones polares, que eran las únicas que podían proporcionar refugio del calor agobiante. Concretemos ahora la situación en las aguas marinas.

Aquí la Gran Mortandad de finales del Pérmico se había llevado por delante a los trilobites, a los foraminíferos, a los briozoos y a algún tipo de coral. Viejos conocidos que ya no volvieron más. El hueco dejado fue colonizado tras grandes esfuerzos por los moluscos, ya fueran bivalvos, ammonoideos, gasterópodos o braquiópodos, los cuales dominaron en los mares y océanos del Triásico.



La biota a inicios del Triásico a partir de Yadong Sun de la University of Leeds. [1]

Los arrecifes formados por esponjas, algas calcáreas y corales rugosos desaparecieron como tales, dando paso en las zonas tropicales del océano de Tetis a los arrecifes de corales pétreos hexacorales. Los primeros de ellos se formaron en aguas relativamente profundas. Eran pequeños, de menos de 3 metros, y estaban construidos por pocos tipos de organismos. A finales del Triásico crecieron en tamaño y biodiversidad al establecer una relación simbiótica con algas.

En las aguas también sobrevivieron los vertebrados: peces y nuevas especies de reptiles que decidieron volver al mar, como mucho más tarde lo harían los mamíferos ballenas o delfines.

Entre los primeros, los peces, inicialmente predominaron los paleoniscoideos, que eran una especie intermedia entre los de esqueleto cartilaginoso y los de esqueleto óseo, y que al final fueron los precursores de los peces con aletas radiadas, entre los que en la actualidad se encuentran los familiares teleósteos: lenguados,

merluzas, salmones y muchísimos más. La tendencia general evolutiva llevó a la producción de colas más cortas y escamas más delgadas, lo que suponía para el animal un progresivo incremento de su agilidad.

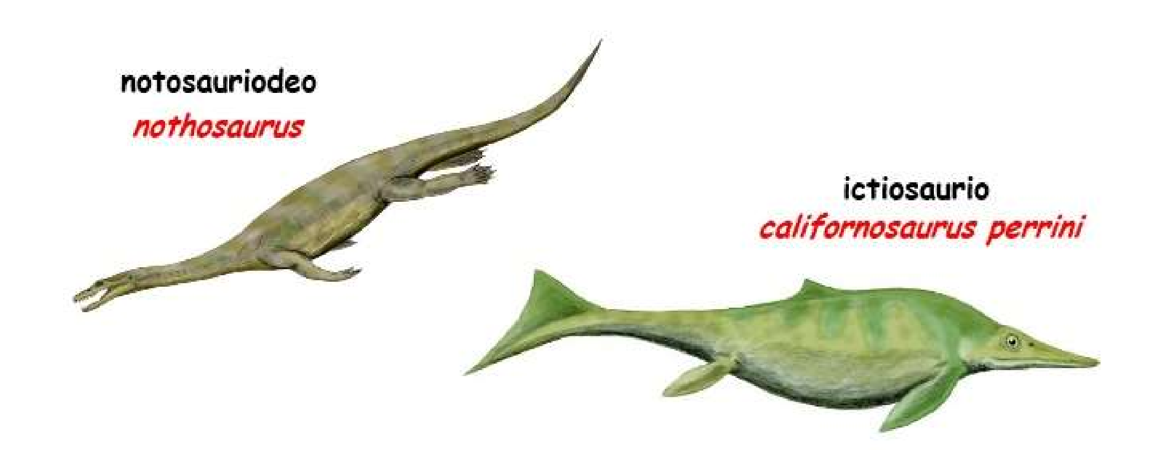
De los peces pulmonados se conservan fósiles del *Ceratodus*, de notable difusión en el Triásico, perdurando durante el resto del Mesozoico.



Representación artística del Ceratodus (Wikimedia, dominio público)

A medida que iban pasando los años, la biodiversidad se iba enriqueciendo en los mares. Las oportunidades de alimentación que suponían peces y moluscos facilitó la aventura de los reptiles. Los escasos reptiles marinos que pudieron sobrevivir a la guadaña de la gran extinción de finales del periodo fueron repoblando los mares a lo largo del Triásico inferior. Los primeros aventureros serían los notosauriodeos, parientes próximos de los placodontos. Tenían un perfecto diseño hidrodinámico y se desplazaban aleteando con las paletas de sus cuatro extremidades. Fueron sustituidos progresivamente por los ictiosaurios, otros reptiles marinos que adoptaron formas más parecidas a los peces e incluso a los modernos

delfines. Seguramente este nuevo diseño resultó más eficaz, ya que sobrevivieron hasta hace 90 millones de años.



Reptiles marinos del Triásico (Wikimedia, GFDL 1.2)

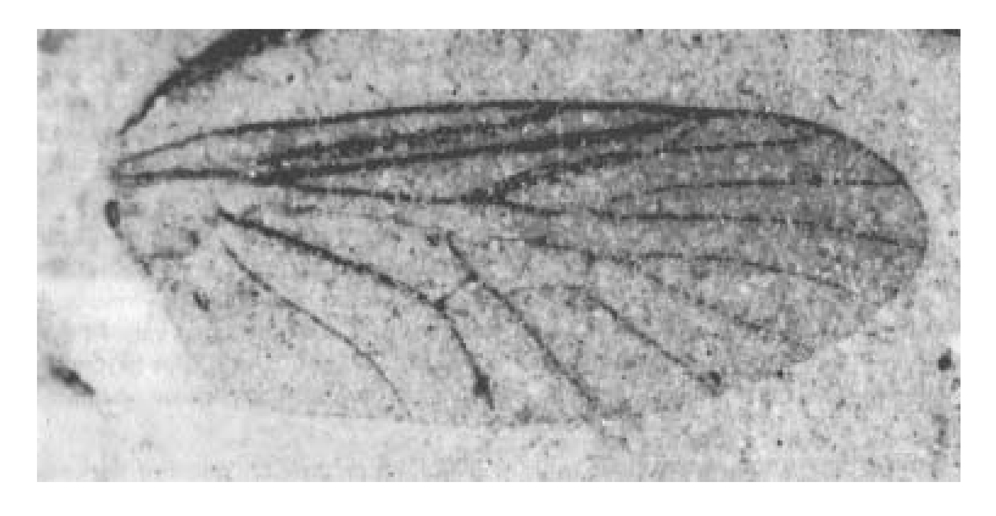
Volveremos a hablar de ellos con más extensión en el siguiente capítulo. También allí explicaremos detalladamente qué sucedió con la biota terrestre.

Adelantamos hoy lo concerniente a los **insectos**, que habían atravesado la terrible frontera de la extinción de finales del Pérmico demostrando una gran capacidad de resistencia. Durante el Triásico la morfología de estos animales, tanto en las diversas fases larvarias como en el estado de adulto, se diversificó, simplificándose los procesos de metamorfosis y ampliando su repertorio de nutrientes, lo que hizo que ocuparan un variado rango de nichos ecológicos. Los escarabajos, moscas y avispas son hijos de esta época. Sabemos que los primeros, los coleópteros, se afianzaron en sus formas más modernas a mediados del Triásico, hace unos 230 millones de años.

En la misma frontera, hace 250 millones de años, aparecen ya los primeros dípteros, las moscas, insectos que habían mutado su segundo par de alas cambiándolos por unos balancines que funcionan como giróscopos. El fósil más antiguo que se conoce de díptero data de 10 millones de años más tarde. Se trataría de un ala de *Grauvogelia arzvilleriana* hallada en un yacimiento fósil de Francia.[2] Se encontró en un terreno arcilloso y de rocas

sedimentarias superficiales correspondientes a un delta fluvial y salobre. Este orden de los insectos surgió en ambientes húmedos, y conforme sus individuos conquistaban ambientes más secos su recubrimiento en la fase de pupa -estado intermedio entre larva y adulto- se hizo más impermeable, al endurecerse el exoesqueleto de la última fase larvaria. Se cree que esta pupa resistente pudo ser lo que permitió a los insectos recuperarse rápidamente tras la crisis del Pérmico, dado que dentro de estas cápsulas podían aguantar en una ralentizada fase "pupal" las condiciones adversas durante mucho tiempo.

Hace 220 millones de años se diversifican los nematóceros, que significa "*cuerno filiforme*" haciendo referencia a sus antenas largas y esbeltas. Entre ellos se encuentran los conocidos mosquitos patilargos que aparecen en otoño. Cuarenta millones de años después, ya en el Jurásico, se diversificaron los braquíceros, las verdaderas moscas.



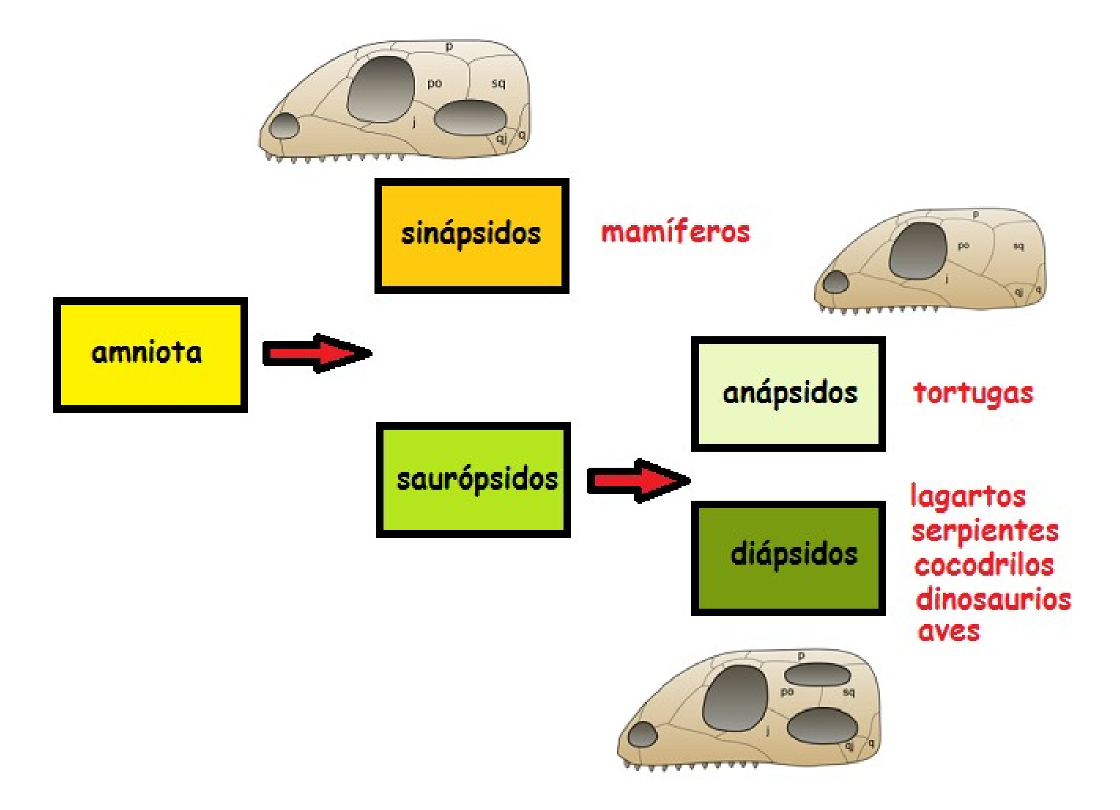
Primer fósil conocido de díptero, ala de Grauvogelia arzvilleriana (referencia: W. Krzemiński et al., ver nota 2 a pie de capítulo, fair use)

Débiles y fuertes: Mamíferos y reptiles

Al comienzo del capítulo habíamos ya comentado que en tierra, incluyendo los hábitats lacustres, la Gran Mortandad había alterado

la existencia de los reptiles. Su presencia estaba muy mermada, y casi podríamos decir que en su mayoría estaban representados por los *mamiferoides terápsidos*, un orden de los sinápsidos, y algunos pequeños *saurópsidos* semiacuáticos. Pronto se inició entre ellos una lucha por el poder.

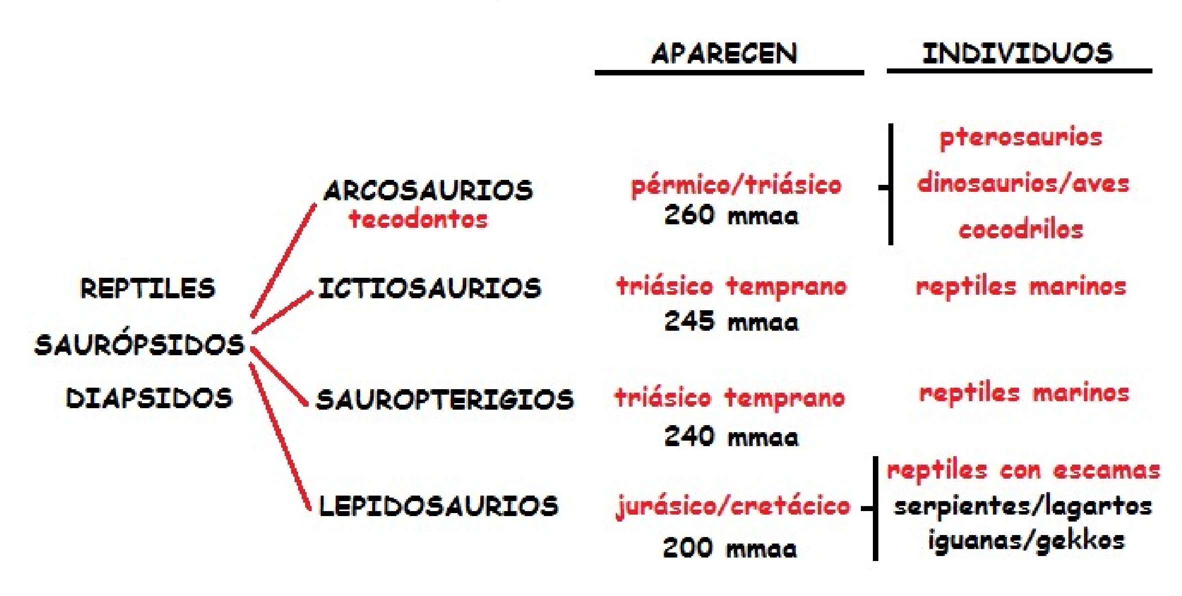
Con objeto de facilitar el seguimiento de estas familias, repetimos de nuevo la imagen con la que cerramos el capítulo dedicado al periodo Carbonífero: el plano filogenético general de los amniotas.



La competencia entre ellos se decantó en un principio por los primeros, los mamiferoides. Ya hemos hablado en el capítulo anterior de *Lystrosaurus,* a medio camino entre reptil y mamífero, y casi omnipresente en todo el territorio de Pangea. Posiblemente fue contemporáneo del pequeño -15 centímetros- norteamericano *Adelobasileus*, el más antiguo protomamífero conocido cuyos fósiles son de hace unos 225 millones de años. Algunos mamiferoides posiblemente habían desarrollado ya un metabolismo que les situaba próximos a la vida de sangre caliente. La extinción de los grandes herbívoros y los carnívoros dinocéfalos había dejado

vacíos sus nichos ecológicos, nichos que fueron ocupados por los supervivientes. Y, a pesar de que la presión de la selección natural los iba empujando hacia tamaños corporales más pequeños, jugaron un importante papel, ya que fueron los precursores de los mamíferos verdaderos, que evolucionaron a partir de ellos a finales del Triásico.

Pero los terápsidos, los futuros mamíferos, fueron al poco superados, con lo que se demostraba que la sangre caliente aún no tenía realmente ventajas competitivas en el mundo seco y árido de la Pangea triásica. Poco a poco se nos venía encima la época del gran esplendor de los dinosaurios dueños del Jurásico, el siguiente periodo, ya que los que realmente estaban preparados para estas condiciones ambientales eran los animales de la rama hermana amniota, los de sangre fría, los saurópsidos. En aquel momento eran pequeños reptiles carnívoros acuáticos que progresivamente fueron ocupando también los espacios abandonados por sus hermanos, los arcosauromorfos, que habían desaparecido. De forma que fueron esos, y en especial las diversas familias y órdenes de los arcosaurios, los que tomaron rápidamente un papel más relevante, dominando la superficie terrestre en este periodo, y relegando a los terápsidos a un papel secundario. Ya les llegaría su época a estos mamiferoides.

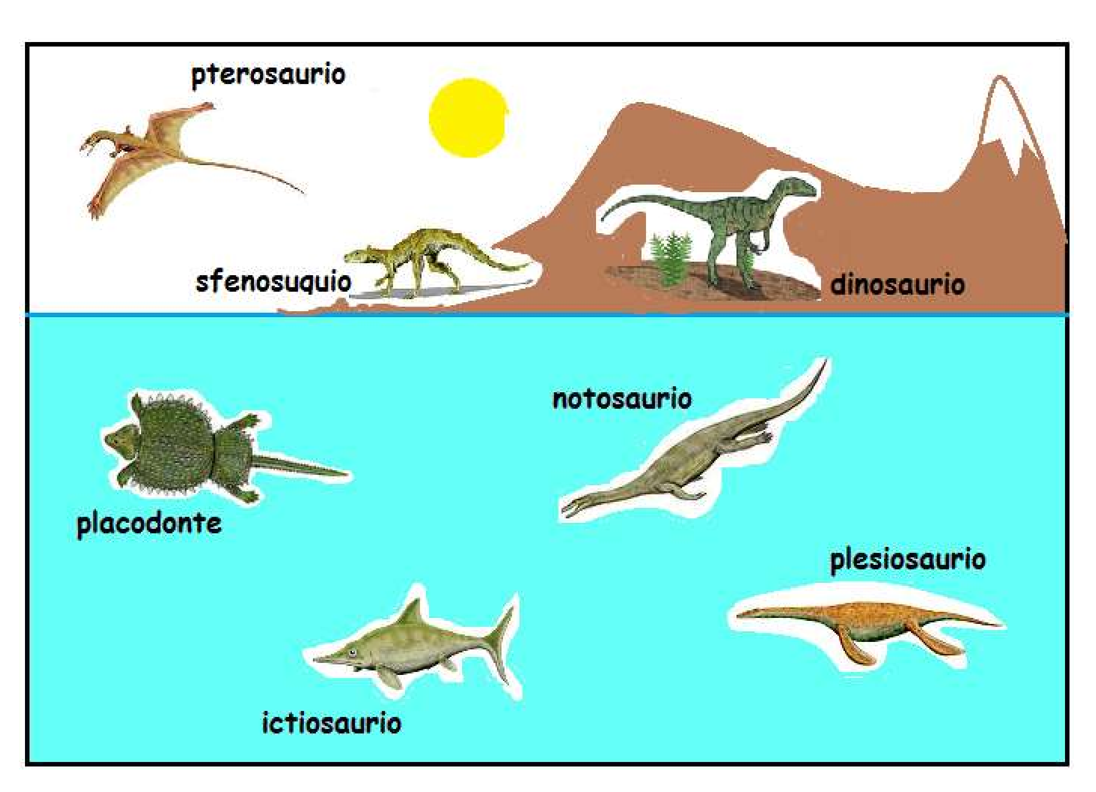


El esquema anterior dibuja el árbol genealógico de los triunfadores, los saurópsidos diápsidos. En él los tecodontos ocupan una posición

paralela a los arcosaurios, ya que fueron un orden muy primitivo de ellos.

Esta línea basal de los primeros animales saurópsidos formó un grupo muy diversificado, que incluía varios animales semiacuáticos con forma de cocodrilo, algunos primitivos y torpes carnívoros también semiacuáticos que convivían compitiendo junto con otros carnívoros terrestres, más grandes y activos, también pequeños herbívoros blindados de desplazamiento bípedo y frágiles cuadrúpedos antecesores de los cocodrilos, además de muchas especies más.

Con el tiempo, hacia mediados del Triásico, aparecieron unos nuevos órdenes de saurópsidos que habrían evolucionado a partir de los primitivos. Llegaron a colonizar todos los medios. *En el agua,* con un abanico variado de especies como los ictiosaurios semejantes al delfín, el falso lagarto notosaurio, los placodontes semejante a las tortugas, y los plesiosaurios, parecido a una foca de largo cuello.



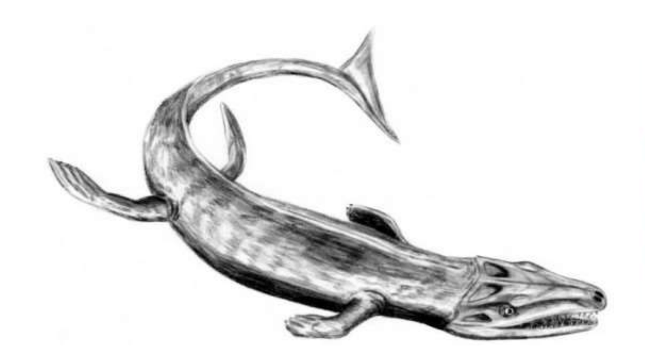
Saurópsidos del Triásico (a partir de Wikipedia)

Fuera del agua hacía tiempo que se había diversificado un nuevo grupo cuyos miembros manifestaban un par de características evolutivas nuevas que consistían, una, en un pequeño agujero a ambos lados del cráneo entre los orificios nasales y los ojos, y otra, en que los dientes estaban incrustados en alvéolos de la mandíbula. Estos detalles caracterizaban a los **tecodonto,** arcosauros muy primitivos que hacen que esta familia de reptiles se diferencie del resto de primos. Este grupo incluía tres órdenes distintos, el de los ancestros de los cocodrilos, el de los dinosaurios -de sus hijas las aves- y el de los pterosaurios.

Primer orden arcosaurio: los cocodrilos. Hace unos 240 millones de años, en la familia arcosauria se desgajó la subclase de los *crurotarsos,* que llegaría hasta los cocodrilos y que fue la que realmente dominó durante lo que quedaba de Triásico. Lo que parece ser el primer fósil conocido de un cocodriloforme corresponde al de un ejemplar de *Teyujagua paradoxa* del Triásico inferior encontrado al sur del Brasil.[3] Se trata de un animal pequeño con un cráneo de apenas unos 12 centímetros de longitud, cuyos dientes curvados y puntiagudas indican que seguía una dieta carnívora. Tenía ya las fosas nasales situadas en la parte superior del hocico, tal como los cocodrilos de hoy en día.

La presión de los "cocodrilomorfos" debió ser tremenda y pudo condicionar el desarrollo corporal de los dinosaurios que en esta época, como hemos comentado, eran de tamaño pequeño o medio. De hecho se han encontrado fósiles de dinosaurios *Herrerasaurus* con marcas de dientes de crurotarsos. Los primeros especímenes de dinosaurios se mantuvieron hasta casi el final del Triásico en un segundo plano, historia casi semejante a la que habían sido forzados a sufrir los mamiferoides terápsidos. Sin embargo la crisis de finales de este periodo, que comentaremos más abajo, dejó en el agua muchos nichos vacíos de antiguos depredadores. Esto último, unido al progresivo incremento del potencial de los dinosaurios en tierra, hizo que durante la frontera temporal con el Jurásico los

cocodrilomorfos fueran colonizando el medioambiente acuático, en donde permanecen actualmente en su gran mayoría.





A la izquierda el crurotarso Dakosaurus maximus (Wikimedia, GFDL 1.2). A la derecha, fósil de Teyujagua paradoxa (Nature, fair use)

Segundo orden arcosaurio: los dinosaurios. Su irradiación comenzó hace unos 230 millones de años, considerándose los géneros más antiguos al *Herrerasaurus* o al *Eoraptor*. El primero era de un tamaño medio, pudiendo alcanzar una longitud entre tres y seis metros, mientras que *Eoraptor* podía llegar hasta el metro. Ambos debían ser bípedos y depredadores en su medio. Los dinosaurios se diversificaron rápidamente, ocupando cualquier tipo de nicho posible, lo que da idea del potencial y eficiencia de estos reptiles.

No obstante no hay que valorar demasiado este hecho que podemos escenificar en la frase "*los dinosaurios fueron unas máquinas abocadas a dominar su entorno*". No. Los dinosaurios tuvieron un proceso evolutivo extremamente condicionado por dos episodios de extinciones masivas de especies y alejado de lo que podemos pensar fue una evolución progresiva gracias a su natural preponderancia. El primer golpe del azar climático se dio hace 230 millones de años en lo que se conoce como el Evento Pluvial del Carniense durante el cual un incremento prolongado de las lluvias alteró las especies vegetales y por tanto la "despensa" de los dinosaurios, entre otros animales. El segundo golpe del azar fue el de finales del Triásico provocado, parece ser, por un fuerte episodio de vulcanismo.

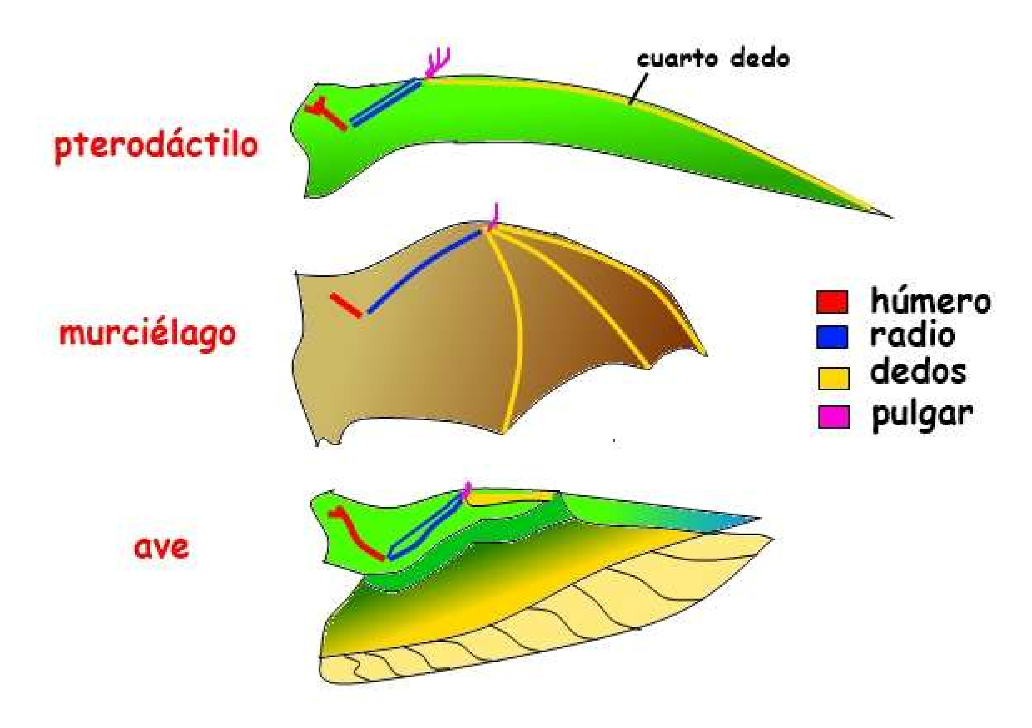
Podemos decir que la “suerte” permitió a unos prometedores especies del Triásico el dominar el panorama durante los dos periodos siguientes.

A pesar de que Eoraptor se ha considerado hasta ahora como el posible ancestro común de todos los dinosaurios, nuestro conocimiento de la historia fósil es necesariamente cambiante. Se cree tener evidencias [4] claras del que pudo ser el primer dinosaurio, o pariente cercano, a partir de fósiles datados hace 243 millones de años, unos 15 millones antes de lo que se creía hasta ahora -cronología corroborada también por otros estudios-.[5] Se tratan de seis vértebras y un hueso de los brazos del animal, encontrados en Tanzania cerca del lago Malawi -antiguamente Nyasa-. Por eso a este dinosaurio se le ha llamado *Nyasasaurus parringtoni*. Tendría cerca de 80 centímetros de alto y hasta tres metros de largo, con una cola de 1,5 metros. Probablemente pesaba entre 20 y 60 kilos. Además de poder ser el dinosaurio más ancestral conocido, su importancia radicaría en que es un sólido apoyo a la hipótesis que establece que este superorden de animales evolucionó en la parte sur de Pangea: los dinosaurios son del sur.



Fósiles del Nyasasaurus parringtoni (Sterling J. Nesbitt et al. 2012, ver nota 4 a pie de capítulo, fair use)

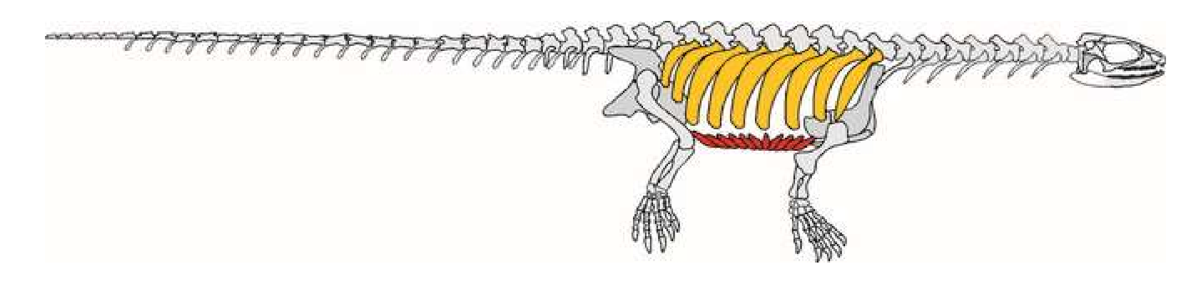
Tercer orden arcosaurio: los pterosaurios. Los animales de este orden aparecieron poco después que los dinosaurios, hace unos 225 millones de años. Fueron los primeros vertebrados en volar. Aunque su origen filogenético es muy discutido, se conocen fósiles ya datados en el Triásico tardío, hace unos 210 millones de años. Corresponden a un esqueleto casi completo de un *Eudimorphodon.*



Comparación de las alas en distintas especies voladoras. Pterodáctilo es un género del orden Pterosauria.

El pterosaurio no era un dinosaurio, animales estos últimos de los que evolucionó la rama lateral de las aves. Tenía cabeza grande, cuerpo pequeño y alas largas y estrechas terminadas en tres garras diminutas y un hipertrofiado largo cuarto dedo. Las alas estaban soportadas por este cuarto dedo y un hueso extra en el antebrazo. A finales del Triásico ya eran capaces de realizar vuelos de una cierta duración, cubriendo distancias inusitadas hasta el momento. Poseía un fino recubrimiento de pelo, lo que pudiera ser un indicador de un metabolismo con sangre caliente. Sin lugar a dudas este tipo de metabolismo es el que necesitaba para poder realizar los prolongados sobresfuerzos que le exigía el ejercicio de batir las alas en vuelo.

Para completar la imagen de los reptiles saurópsidos nos queda hacer un apunte sobre su subclase anápsida de la que actualmente sólo continúan entre nosotros las tortugas. Hace 240 millones de años vivía, por lo menos en el lago alemán de Vellberg, un animal con aberturas diápsidas en su cráneo, al que se lo considera un posible vínculo entre los ancestros más primitivos y los ejemplares de tortugas actuales. En un arrebato de originalidad los científicos le han nominado como "*abuelo de las tortugas*", que eso significa *Pappochelys*.[6] No tenía aún un caparazón cerrado aunque disponía de unas costillas anchas, una de las características de las primeras tortugas, y una serie de huesos a lo largo de su vientre. Nos tenemos que desplazar temporalmente unos 20 millones de años más tarde para encontrar en los fósiles de *Odontochelys*, que vivió en Asia meridional durante el Triásico, a las primeras verdaderas tortugas anápsidas. Ello supone que el de las tortugas sea uno de los grupos de reptiles más antiguos, mucho más antiguo que el de los lagartos y serpientes. *Odontochelys* era acuática y poseía un plastrón (parte ventral del caparazón) bien definido, aunque el espaldar era primitivo. La siguiente tortuga cuyos fósiles se conocen fue *Proganochelys*, que vivió en el Triásico superior en Eurasia hace unos 210 millones de años. Era una tortuga primitiva terrestre, con un caparazón parecido al de las especies actuales, pero poseía aún dientes en el paladar. La cabeza, cola y patas no podían retraerse dentro del caparazón, pero estaban protegidas por espinas.



Esqueleto del cuerpo de Pappochelys, el "abuelo de las tortugas", visto desde el lateral (Rainer Schoch, Nature, ver nota 6 a pie de capítulo, fair use)

Y hasta aquí la débil situación de los mamíferos y el predominio reptil durante el periodo Triásico. En los siguientes capítulos hablaremos extensamente acerca de los dinosaurios ya que en su época fueron animales condicionantes de la vida en la Tierra.

Entre las tres estrellas que desfilaron por la alfombra roja del Triásico fueron los más glamurosos. Un aerolito cortó en seco su ascendencia. La segunda fue la aparición de los mamíferos, aunque permanecieron por muchos años en un segundo plano ocultos por la imbatible competencia de los dinosaurios. También hablaremos de ellos en su momento. La tercera estrella de oro de este periodo fue la conquista del aire por los vertebrados, materializada como hemos comentado en los pterosaurios, los primeros vertebrados voladores en la historia de la tierra.

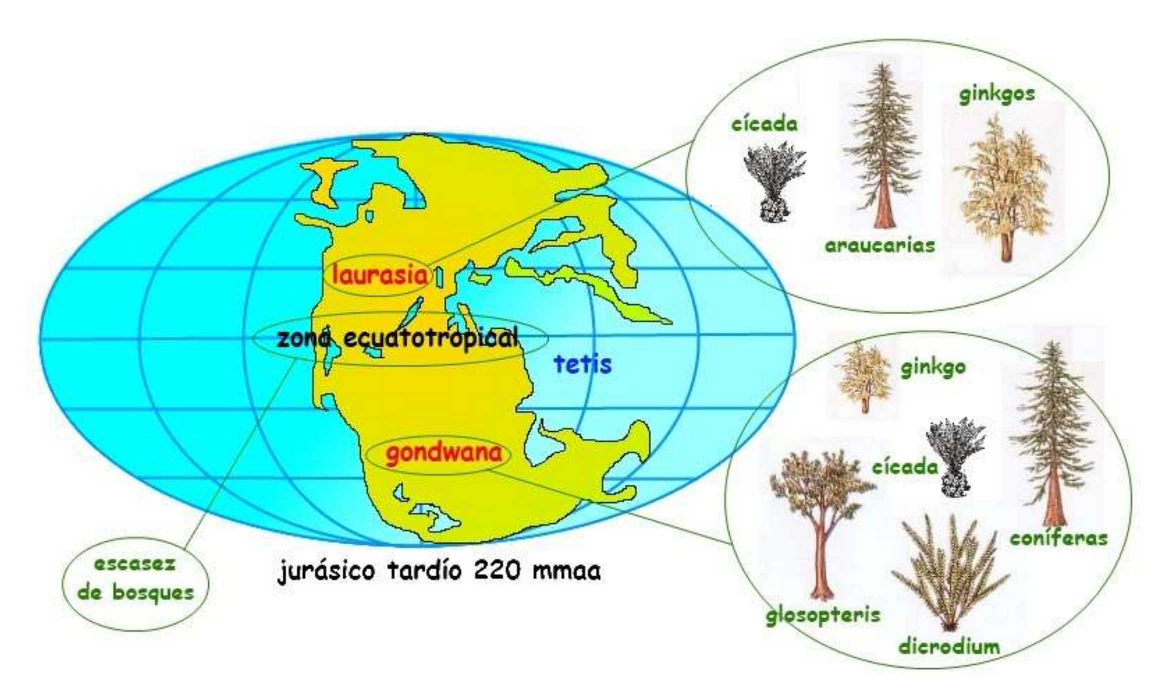
¿Y qué había sucedido con las plantas?

Realmente las condiciones extremas que habían afectado gravemente a la vida animal no tuvieron una incidencia semejante en la biomasa. Ya el clima del Pérmico había comenzado a ser seco y árido, por lo que, como hemos comentado en su momento,[7] los bosques tropicales habían disminuido, y sin embargo las plantas resistentes a las sequías, plantas con semillas como coníferas, helechos arbóreos o cicadáceas, habían prosperado en un entorno propicio para ellas.

De todas formas, al final del Pérmico habían desaparecido casi todos los esfenofitos -plantas tipo caña como las calamites- y los licopodiofitos arborescentes -los helechos de terrenos húmedos-, quedando únicamente representantes de pequeño tamaño. Aunque como hemos comentado, la flora del Triásico, con algunas variantes, fue muy semejante a la de finales del Pérmico.

La forma del continente Pangea condicionó en gran medida la distribución de las plantas sobre su geografía. Si bien como regla general es cierto que en todo el territorio el clima fue seco y caluroso, con una estacionalidad muy acusada, el océano Tetis y la inmensidad

continental en la franja ecuatorial supusieron una barrera para la expansión norte/sur de las especies vegetales, diferenciándose su distribución en las dos regiones resultantes: Laurasia al norte, más seca, y Gondwana al sur, más húmeda.



Esquema de tendencia en la distribución de plantas sobre Pangea durante el Triásico (imágenes de plantas, killerinourmidst.com, fair use)

El *norte* de Pangea fue exuberante, en donde las coníferas araucarias fueron los árboles predominantes entre los de mayor tamaño. Agrupaciones de helechos arbóreos y ginkgos formaban el dosel vegetal de un sotobosque de helechos ubérrimos, cicadáceas y maleza.

En la región ecuatorial las condiciones eran menos favorables para el desarrollo de las plantas, de forma que durante muchos años los bosques fueron muy escasos. Los pocos que había estaban formados por coníferas y cicadáceas. El final del Triásico fue más húmedo, lo que favoreció el crecimiento de las plantas y la recolonización animal de la zona por pequeños herbívoros del tipo de los cinodontos, que ya sabemos que llevaban la semilla de los futuros

mamíferos, aunque la fauna predominante en el norte siempre fue la de los arcosaurios.

En *el sur*, sobre la antigua Gondwana, la predominancia de los helechos arborescentes fue clara, evolucionando con el tiempo desde el tipo *Glossopteris* al tipo *Dicrodium*. Este último fue ubicuo, pudiéndose encontrar desde parameras hasta en espesos bosques, o en tierras de secano. A veces era la única especie que se encontraba sobre el terreno. Le acompañaban en menor medida alguna conífera y flora propia de Laurasia, como ginkgos y cicadáceas.

En algunas partes de Gondwana los árboles mencionados fueron relegados a un segundo plano por gigantes helechos con semilla, los cuales crecían tanto que formaban el dosel superior de los bosques, con pequeños helechos y licopodios herbáceos en la umbría de su base. No obstante, en el hemisferio sur también coexistían las coníferas, especialmente a partir del Triásico medio. La exuberancia de la vegetación en el sur de Pangea favoreció la diseminación de los terápsidos herbívoros.

Quien sabe, quizás la imagen de más abajo sea una copia exacta de algún recóndito paisaje de Pangea. Bien pudiera ser un rincón de Laurasia junto a un lago marino en el interior de la recortada costa de Cimmeria, hace unos 220 millones de años. Que vuele la imaginación. El ambiente se presiente pesado por la extrema temperatura, casi se respira el aire húmedo del caer de la tarde. Los tendidos rayos del sol poniente dibujan una pincelada de claridad sobre la familia de *Lystrosaurus* que pastan en la orilla. Tras ellos, una concentración de calamitas. En lo más alto del cielo las colosales nubes monzónicas anuncian una fragorosa tormenta. El agua calmada durante estos momentos precursores de la debacle sólo se ve alterada por el nadar nervioso, posiblemente depredador, de un fitosaurio parecido a los modernos cocodrilos. Al fondo, altas coníferas conforman un agradable y potente bosque, a la derecha unas araucarias. Por delante, a la izquierda casi en primer plano un esbelto ginkgo. Sobre la orilla derecha un grupo de veloces *Celofisis*,

unos pequeños dinosaurios oportunistas y carroñeros, buscando unos despojos a la espera de una presa despistada. Cubriendo el primerísimo plano de las bambalinas, unas matas de helechos y unos lycopodios herbosos, alimento suculento para los cercanos herbívoros.



Representación artística de un paisaje triásico con una aplastante atmósfera (Sam Noble Oklahoma Museum of Natural History, autora: Karen Carr, fair use)

A la placentera escena le quedaban pocos días…

Extinción triásico-jurásico

El Triásico finalizó hace 200 millones de años con una nueva extinción masiva de la vida sobre el planeta, que afectó en mayor medida al medio marino. En el océano, un 22% de las familias y posiblemente la mitad de los géneros desaparecieron. De los reptiles marinos sólo sobrevivieron los ictyosaurios y los plesiosaurios.

En tierra se extinguieron un gran número de grandes arcosaurios y los mayores anfibios. También afectó a los pequeños animales, en

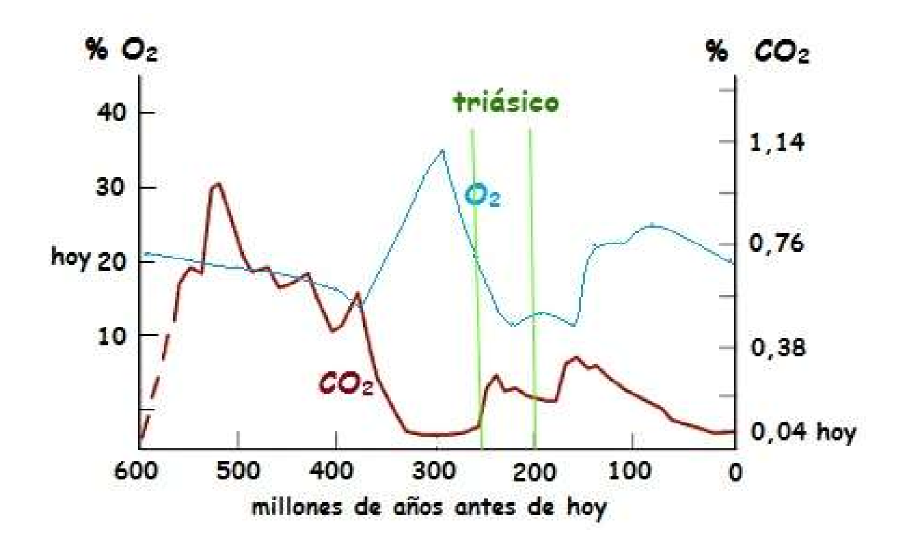
su mayoría reptiles, incluidos los terápsidos, de los que se salvaron los protomamíferos.

No todos los dinosaurios lograron sobrevivir, pero los que lo hicieron se expandieron rápidamente durante el posterior Jurásico y dominaron los hábitats terrestres a lo largo del resto de la Era Mesozoica.

¿Cuáles fueron las causas de estas extinciones?

Todo indica que fue una consecuencia del exacerbado vulcanismo, aunque la explicación no está muy clara. Para el biotopo marino, los últimos estudios apuntan a un incremento del CO_2 atmosférico que acidificó las aguas marinas. Veamos el porqué.

Es cierto que el registro fósil indica un incremento de ese gas. El origen es conocido ya que, en la frontera del Triásico con el Jurásico, Pangea había empezado a escindirse según un corte más o menos ecuatorial, continuación de la dorsal del océano de Tetis. Esto provocó un incremento del vulcanismo y una gran emisión de dióxido de carbono.



En 2013 el geólogo Terrence J. Blackburn y colegas suyos presentaron un estudio [8] basado en el análisis de la presencia de isótopos de uranio en rocas basálticas de la época, distribuidas a lo

largo de diversas partes del planeta. La actividad volcánica de la época había expulsado volúmenes ingentes de lava a lo largo de cuatro cortos episodios -de tipo pulso- durante un periodo que duró 600.000 años y que generó lo que se denomina la Provincia Magmática del Atlántico Central. La cronología del episodio volcánico está soportada por datos paleomagnéticos acerca de una inversión del campo magnético terrestre, que coinciden con los datos de la precesión del eje terrestre,[9] que manifiestan determinadas características de las rocas sedimentarias de la época. La conclusión de las dataciones basadas en el uranio acota el tiempo máximo entre la crisis volcánica y la crisis biológica de la extinción de finales del Triásico en 20.000 años. Lo cual parece asegurar una relación causa-efecto entre ambos episodios.

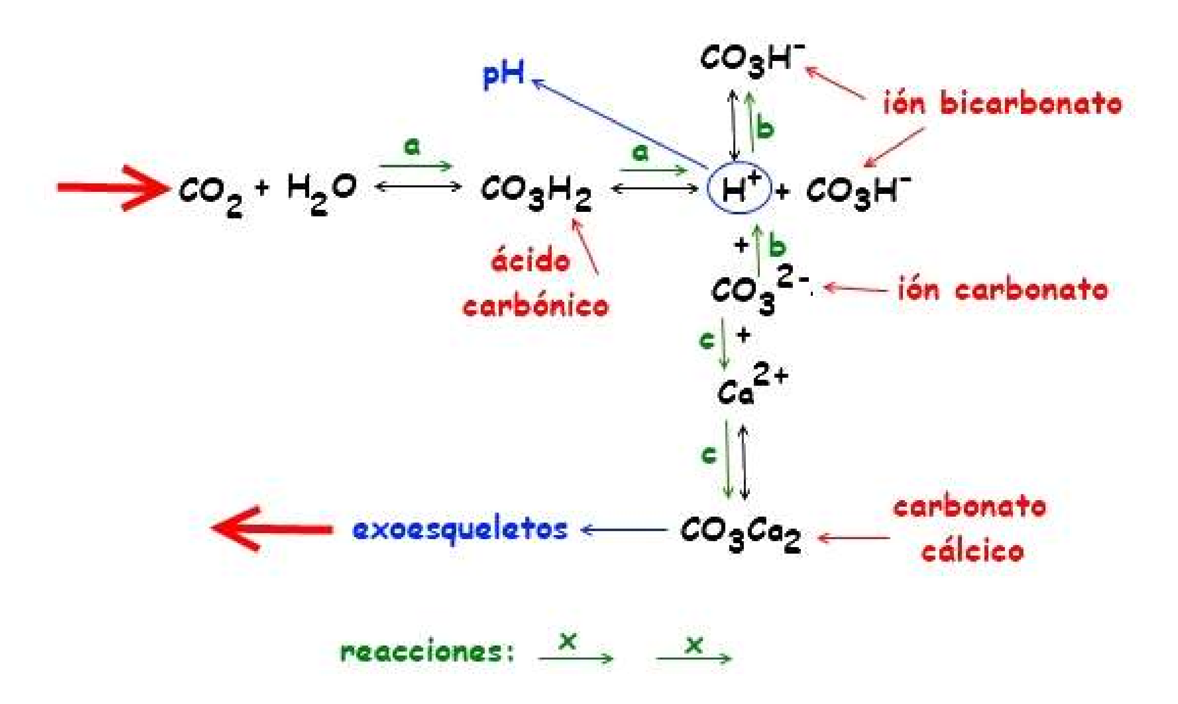
No obstante no todo parece tan evidente para otros, como podemos verlo en la publicación de 2012 [10] firmada por la geoquímica Bärbel Hönisch y colegas, en la que, tras analiza los sucesos geológicos durante el Fanerozoico, arguyen que no se encuentra una correlación absoluta entre la acidificación del mar y el grado de saturación del carbonato cálcico, posiblemente dado que intervienen otros muchos factores.

Para entender mejor la base del proceso daremos una breve pincelada "físico-química" acerca de por qué el incremento del CO_2, producido por el repunte de la actividad volcánica de finales del Triásico, afectó negativamente a la biota generadora de exoesqueletos de carbonato cálcico. Podemos seguir la argumentación en la figura de más abajo.

Una mayor concentración de CO_2 en la atmósfera supone una mayor presión de este gas sobre la superficie del agua, lo que favorece que una mayor cantidad de sus moléculas puedan disolverse. Condicionado por la temperatura de cada momento, claro. En los mares el dióxido de carbono reacciona con el agua pasando a formar ácido carbónico que se disocia en un ión hidrógeno y un ión bicarbonato. El primero de ellos a su vez puede capturar un ión

carbonato, que ya se encontraba en el agua, transformándose en otro ión bicarbonato. Atención, por esta reacción el biotopo marino ha perdido en su stock un ión carbonato, ladrillo esencial de los exoesqueletos. Por tanto, la consecuencia de una mayor acidez es que va a haber menos iones carbonato libres en el agua.

Por otro lado en el mar se encuentra también calcio disuelto en forma de Ca^{2+}. Al igual que sucede con el ya mencionado ión carbonato, proviene en su mayor parte de las escorrentías continentales que transportan los productos de la meteorización de las tierras hasta el mar, o de la propia disolución del carbonato cálcico de los fondos marinos o del biológico de los propios exoesqueleto. El ión calcio tiene la tendencia a unirse con nuestros iones carbonato y bicarbonato, pudiendo dar carbonato cálcico o bicarbonato cálcico.



El hecho es que los animales o plantas acuáticos generadores de conchas, cascarones o espículas en base al calcio, lo hacen usando la sal de carbonato y no la del bicarbonato. Posiblemente la evolución lo hizo así ya que la segunda es más soluble que la primera y por tanto tenía que ser menos eficaz en la carrera armamentística predador-predado.

Ahora sí podemos concluir: El dióxido de carbono formó ácido carbónico con el agua, incrementando su acidez, que a su vez afectó a la capacidad que tenían los organismos de crear exoesqueletos carbonatados, viéndose tremendamente afectados los corales y otros animales o algas con conchas y caparazones que habitaban los mares.

Tras esta digresión teórica despidámonos del Triásico. Como en otros periodos, éste también acaba en crisis, la cuarta gran crisis del Fanerozoico. La circunstancia no debe ser objeto de sorpresa, puesto que la frontera geológica entre eras y periodos casi siempre se apalanca en un episodio crucial para la vida de nuestro planeta Tierra. No deja de ser una decisión de geólogos. En este caso el Triásico acaba con un mar depauperado y una tierra, a pesar de los pesares, prometedora: ¡atacan los dinosaurios! ¡Y en el banquillo, los jóvenes pero bien preparados mamíferos!

El siguiente capítulo se presenta interesante.

NOTAS DEL CAPÍTULO 39:

1. Según esta publicación de Science, "*Lethally Hot Temperatures During the Early Triassic Greenhouse*", Yadong Sun et al., de octubre de 2012.
2. En este artículo de "Acta zoologica cracoviensia", 46 (suppl. – Fossil Insects): 153-184, Kraków, podéis encontrar el informe completo sobre el descubrimiento de *Grauvogelia arzvilleriana*. "*Triassic Diptera; descriptions, revisions and phylogenetic relations*", Wieslaw Krzemiñski and Ewa Krzemiñska (2002).
3. "*An exceptional fossil skull from South America and the origins of the archosauriform radiation*", Felipe L. Pinheiro et al. En

este artículo de Nature de marzo de 2016 encontraréis la referencia a este descubrimiento.

4. "*The oldest dinosaur? A Middle Triassic dinosauriform from Tanzania*", Sterling J. Nesbitt et al. (diciembre 2012). Más detalles en esta publicación de la revista Biology Letters de la The Royal Society, febrero 2013.
5. Más detalles en la web del Servicio de Información y Noticias Científicas (SINC), "*Los primeros dinosaurios aparecieron poco después de sus precursores*" de diciembre de 2015.
6. Más detalles sobre esta tortuga en esta publicación de la revista Nature de junio de 2015. "*A Middle Triassic stem-turtle and the evolution of the turtle body plan*", Rainer R. Schoch y Hans-Dieter Sues.
7. En el capítulo 36 de este libro, "*El Pérmico: fin del Paleozoico*".
8. "*Zircon U-Pb Geochronology Links the End-Triassic Extinction with the Central Atlantic Magmatic Province*", Terrence J. Blackburn et al. Publicado en la revista Science de mayo de 2013.
9. En astronomía la **precesión de los equinoccios** es el cambio lento y gradual en la orientación del eje de rotación de la Tierra que hace que la posición que indica el eje de la Tierra en la esfera celeste se desplace alrededor del polo de la eclíptica, trazando un cono y recorriendo una circunferencia completa cada 25 776 años de manera similar al bamboleo de un trompo o peonza.
10. "*The Geological Record of Ocean Acidification*", Bärbel Hönisch et al. Que podéis encontrar en la revista Science de marzo de 2012.

40. Parque Jurásico

Dejamos las páginas anteriores una vez más con el corazón encogido. No era la primera vez en esta historia que nos había tocado presenciar un retroceso brutal de la biodiversidad. Nos encontrábamos a finales del periodo Triásico, durante el que habían señoreado los reptiles. Muy al principio los mamiferoides lograron ser la locomotora de la repoblación tras la catástrofe de la extinción del Pérmico. A ellos les siguieron los muy preparados saurópsidos en su versión "*familia cocodrilo*". Muy al final del periodo cederían el testigo a sus primos los dinosaurios, por entonces aún en versión reducida. Tras la crisis con la que terminó el Triásico estos saldrían reforzados; mientras los mamíferos, activos, laboriosos y vigilantes, esperaban sus oportunidades. En este capítulo vamos a empezar a ver este renacer adentrándonos en el Jurásico, periodo que bascula entre 200 y 145 millones de años antes de hoy.



El nombre de Jurásico proviene de las primeras rocas estudiadas de este periodo, que se encuentran en los montes del Jura, prolongación

de los Alpes entre Suiza y Francia. Es también en este periodo cuando Pangea se empieza a desmembrar, con el resultado de la separación de las tierras del hemisferio norte y las del sur.

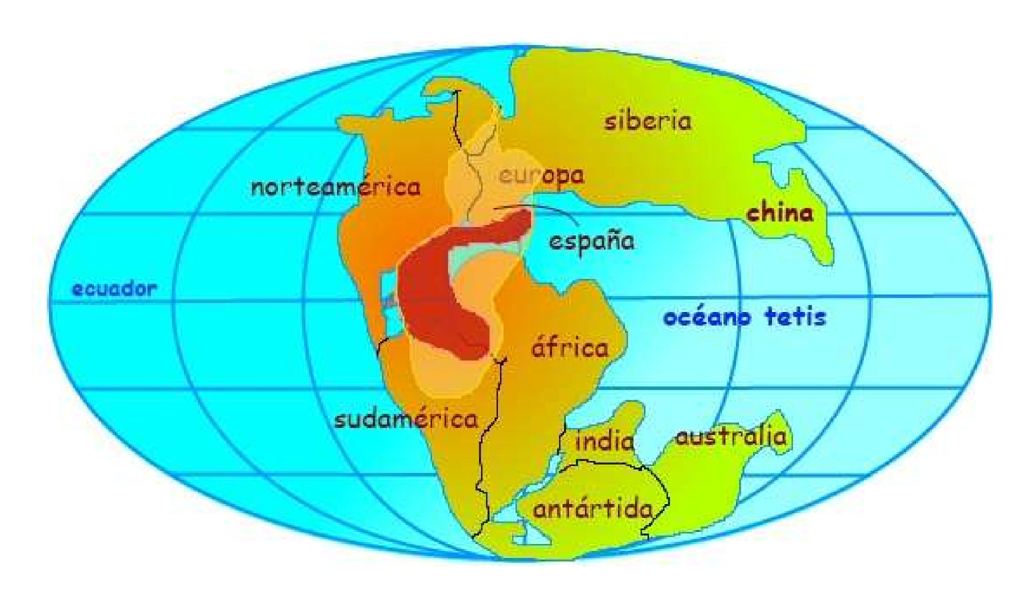
Ésta es la época de los dinosaurios, los δεινός σαῦρος, los "*lagartos terribles*", que dominan la Tierra. Las aves verdaderas comienzan a surcar los cielos, mientras que quedaban aún en segundo plano los activos mamíferos.



Pangea empieza a movilizarse y a rotar todas sus piezas, cada una de ellas empujada por distintas fuerzas, motorizadas por la inusitada actividad de las dorsales oceánicas, que poco a poco iban adentrándose en los continentes. Los rifts que se formaron se transformaban en fallas hundidas que se iban anegando de agua, aumentando progresivamente la superficie líquida del planeta gracias al creciente número de mares de aguas someras que iban apareciendo.

El más importante fue el rift ecuatorial de Pangea, que progresivamente se fue abriendo para originar lo que sería el Atlántico Norte con dos ramificaciones, una que generaría el golfo de Méjico y otra que iniciaría la separación de África y Sudamérica.

En el sur, otro rift secundario se generó entre las actuales África e India. Junto a estas tremendas grietas magmáticas se generaron un sinnúmero de volcanes que dejaron grandes cantidades de lavas basálticas.



Región de volcanes y de extrusión de coladas basálticas que llegaba desde Brasil hasta España a inicios del Jurásico

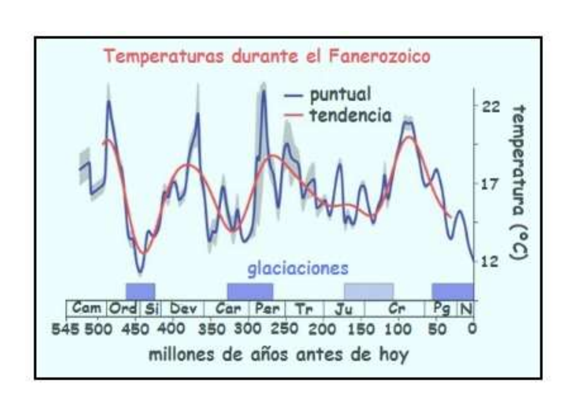
Posiblemente la importante actividad volcánica con emisión de grandes volúmenes de magma fue la que motivó el que el nivel del mar durante el Jurásico se elevara, lo que se tradujo en la inundación de grandes extensiones de tierra, como podemos comprobar que sucedió en el centro de Norteamérica y en casi toda la futura Europa, que en aquel momento era más un conglomerado de islas que un auténtico continente. Esta circunstancia fue la que propició la formación de ricos depósitos sedimentarios de calizas. Junto a las costas se crearon también abundantes depósitos sedimentarios de rocas fragmentadas cementadas con materiales finos, que al consolidarse quedaban aprisionados en su interior formando así una especie de guirlache.

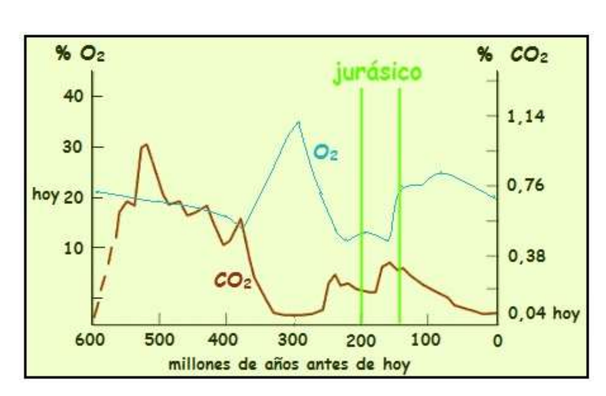
Mientras en la costa norte del océano de Tetis se consolidaba la orogenia Cimmeriana de la que ya comentamos en el capítulo 38 acerca del Triásico, el movimiento hacia el oeste de Laurasia sobre

el océano Pacífico inició el arco orogénico norteamericano de las Montañas Rocosa y de Sierra Nevada.

El incremento de la erosión y sedimentación en las cada vez más extensas líneas de costa, hizo que los cadáveres de los animales marinos que antes se descomponían en el fondo del mar consumiendo oxígeno, ahora no lo hicieran al estar enterrados por capas y capas de calizas. La consecuencia fue el incremento de este gas en la atmósfera. En donde también iba creciendo la concentración del CO_2 emitido por la intensa actividad volcánica en los rifts y dorsales.

El anterior panorama esconde los datos claves condicionantes del clima durante el Jurásico, lo que impuso un cambio de tendencia en el posterior Cretácico. Comentaremos con mayor detalle el proceso en el siguiente capítulo.





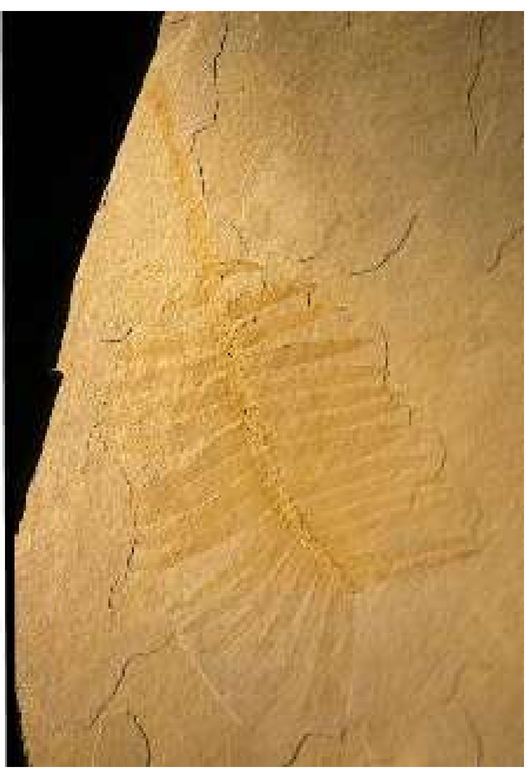
Se había salido del Triásico con un clima que empezaba a cambiar debido al inicio de la ruptura de Pangea. Las temperaturas globales presentaban unas tendencias a la disminución, aunque manteniéndose los máximos en unos 5º o 6º superiores a las medias actuales, apoyado por el efecto invernadero de un cada vez más abundante CO_2. La humedad en el interior del continente se había incrementado, e incluso se debían producir nevadas estacionales en las regiones polares. Durante todo el Jurásico la tendencia siguió el mismo rumbo: más humedad y estacionalidad menos extrema, manteniendo un nivel medio alto de temperaturas.

La biota vegetal.

Habíamos dejado a la Pangea del Triásico con un clima y un territorio árido que poco a poco fue cambiando a medida que se introducía el Jurásico, cálido y húmedo. La influencia fue grande en especial en las latitudes elevadas, ya que allí comenzaron a prosperar bosques de jungla con una rica vegetación. La compartimentación de los continentes hizo que la flora fuera diversa y geográficamente muy particular.

Las gimnospermas fueron las plantas mejor representadas. Entre ellas dominaban nuestras conocidas del Triásico las cicadáceas, árboles semejantes a las palmeras con troncos rechonchos y una fronda de hojas que recuerdan también a la de las palmeras.





La actual cícada Cycas rumphii y fósil de la especie Zamites feneonis (Wikimedia, GFDL 1.2 y CC BY-SA 3.0 Unported)

De todas formas, las coníferas siguieron siendo los árboles más grandes conjuntamente con los helechos arbóreos, que podían

alcanzar los 20 metros de altitud. En latitudes medias y altas del hemisferio norte siguieron proliferando los ginkgos mientras que las podocarpáceas, una especie de araucaria, abundaban en el hemisferio sur. Bajo estos árboles prosperaban los pequeños helechos.

En los cinturones de clima tropical y cálido, que eran las regiones donde habitaban preferentemente los dinosaurios, continuaba el paisaje del Triásico con escasez de bosques y una abundancia en vegetación abierta de matorrales y pantanos.



Paisaje del Jurásico (autor: John Sibbick, fair use)

De nuevo dejamos volar la imaginación, y antes de rellenar el escenario con la fauna, nos trasladamos al pasado gracias a la anterior representación artística de un paisaje del Jurásico. Al fondo, unos cerrados bosques de coníferas. El primer plano está dominado por cicadáceas y helechos. También un tronco caído sobre el pantano, que posiblemente se transformará en carbón al ser engullido por el limo.

La biota animal

Así como el clima y la vegetación del Jurásico fueron una continuación del anterior Triásico, lo mismo sucedió con la fauna. La naturaleza fue pródiga con los dinosaurios. Y por lo que nos importa a nosotros, cuidadosa con los escurridizos mamíferos. Con el resto de especies continuó trabajando en una tranquila vía evolutiva. De todas formas, las crónicas del momento bien pudieran hablar de los siguientes temas.

Entre los **insectos** le seguiremos la pista a los himenópteros, ya que a principios del Jurásico tuvieron lugar dos hechos evolutivos fundamentales: la aparición de la cintura de avispa y el desarrollo del parasitismo. La estrategia del parásito consistía en poner los huevos dentro del animal parasitado, de forma que las larvas podían alimentarse de sus tejidos mientras disfrutaban de un "hogar" donde desarrollarse.



Fósil de la "mosca escorpión "Lichnomesopsyche gloriae en el que se aprecia claramente la probóscide (Imagen: Wenying Wu, ver nota 1 a pie de capítulo, fair use)

Otra de las grandes innovaciones de los himenópteros apareció a finales de este periodo, y fue el desarrollo del aguijón que inicialmente se usaba para matar o paralizar presas, tal y como hacen algunas especies en la actualidad, y que posteriormente se desarrolló como arma defensiva.

También en este periodo encontramos lo que parecen ser los primeros insectos polinizadores -en este caso de las plantas gimnospermas del momento- representados por las viejas "*moscas escorpión*", los mecópteros, que ya a finales del Jurásico habían desarrollado una probóscide.[1]

En el mar continuaba floreciendo la fauna que conocemos del Triásico con una gran variedad de invertebrados. Dijimos más arriba que en estos momentos Pangea se estaba dividiendo, dejando entre las partes resultantes mares no muy profundos en donde las condiciones para la Vida eran espléndidas. Se cree que esto pudo ser el motor evolutivo que empujó hacia la aparición de nuevas especies marinas, modificación de las más antiguas, con unas incrementadas capacidades de predación y supervivencia. En estos mismos momentos una revolución semejante alteraba también la vida de los invertebrados marinos, lo que se conoce como la Revolución Marina del Mesozoico de la que hablaremos en el próximo capítulo 44, "*La biota animal en el Cretácico I*".

Así pues, entre los **peces** aparecen por primera vez un tipo de teleósteo y grupos de modernos tiburones. Los primeros habían osificado su esqueleto, lo que les permitía insertar más potentes músculos. No sólo eso, se habían despojado de las pesadas escamas protectoras de sus antepasados y su aleta caudal se había hecho simétrica, lo que le proporcionaba una mayor eficiencia y maniobrabilidad. En resumen, los nuevos teleósteos eran peces mucho más ágiles, veloces y con gran dinamismo. Ventajas evidentes tanto a la hora de predar como de no ser predados. El más primitivo de ellos -apareció durante el Triásico tardío- fue *Pholidophorus*. Esta potente evolución de los teleósteos impactó

tremendamente en la de los tiburones. Cosas de las carreras armamentísticas. De forma que pasaron de los fenotipos propios de los *Hybodontiphorma* a los de los modernos tiburones, los *Neoselacimorpha*, lo que permitía a estos últimos una natación más potente de forma que, a finales del Cretácico, los primeros habían desaparecido bajo la presión de los segundos.

En las aguas del Cretácico también continuaron los **reptiles** marinos del periodo anterior, como los ictiosaurios y familia, así como los voladores pterosaurios. De esta época son también las primeras evidencias de las serpientes ya que se conocen al menos cuatro nuevas especies, procedentes de Inglaterra, Portugal y Estados Unidos, cuyos fósiles datan de hace entre 167 a 143 millones de años. No se sabe muy bien si eran terrestres o marinas.[2]



Imagen artística de una serpiente que viviría en la frontera entre el Jurásico y el Cretácico Inferior (Foto:Julius Csotonyi, fair use)

Los cocodrilomorfos, de los que comentábamos que dominaron los finales del Triásico, siguieron siendo abundantes y diversos tanto en agua como en tierra.

Y no nos vamos a despedir en esta pequeña reseña del mundo animal sin hablar de los **anfibios,** ya que es en este periodo cuando aparecen las nuevas formas que nos van a acompañar hasta el día de hoy: ranas, sapos, tritones y salamandras. A su lado seguían decayendo

los ancestrales temnospóndilos, viejos conocidos desde el Pérmico o incluso antes.

A pesar del continuismo en la biosfera que parece insinuar una gris monotonía, en este periodo Jurásico hay que resaltar y poner foco en dos argumentos fundamentales. El primero corresponde al desarrollo y dominio de los dinosaurios a lo largo de los 135 millones de años que aún quedan del Mesozoico, y el segundo, relativo a la escondida vida de los mamíferos, expertos supervivientes en el mundo hostil de los dinosaurios, y que sólo explotarían cuando aquellos desaparecieron a finales del Cretácico.

Ambos, **mamíferos** y **dinosaurios**, como parientes del árbol genealógico de los reptiles, representan dos alternativas metabólicas, dos apuestas distintas para afrontar la vida, dos caminos impulsados por las circunstancias del medioambiente y acotados según criterios de selección natural.

Todo va de movimiento y resistencia. La Vida exige, lógicamente, actividad, agilidad y velocidad, características dinámicas fundamentales para sobrevivir, alimentarse, depredar, huir o aparearse. Y eso se puede llevar a cabo aplicando diversas estrategias. La de los reptiles, por ejemplo, implica un metabolismo basal bajo, pero con el suficiente punto de potencia instantánea como para salir de la necesidad en una milésima de segundo: veo una mosca y arranco a correr, percibo una amenaza y llego al abrigo en un suspiro… pero hecho lo hecho, me he agotado y ya no puedo más. Un reptil tras una carrera tiene que parar a descansar y reponer su respiración, su temperatura corporal se le agota rápidamente. Tienen un metabolismo basal bajo y un sistema de sangre "fría" que no les permite una regulación fina y continua en la generación/consumo de energía en el esfuerzo. De hecho, los reptiles se enfrían mucho por la noche, pierden capacidad de actuación en estos momentos en donde cuentan exclusivamente con su metabolismo basal, que por definición es muy bajo y sin posibilidad de recargarlo hasta que la luz solar caliente el día, y eso es lo que hacen antes de iniciar su

jornada o tras un esfuerzo puntual: se suben a una piedra cara al sol. Tienen potencia, pero no resistencia a corto plazo. Y eso es importante si eres pequeño, más pequeño que tus depredadores. Quizás por ello la selección natural fue pastoreando a algunos reptiles, los dinosaurios, hacia cuerpos cada vez mayores, con los que la única preocupación era conseguir comida o conseguir pareja. Y para esto, siendo gigante, con poder pegar una carrerita o comer vegetales estaba todo resuelto. Por lo tanto, la primera alternativa metabólica: acelerador puntero pero de corto recorrido, relativamente pocas necesidades alimentarias, proceso que tampoco necesitaba que fuera extremadamente eficiente, vida diurna y modorra nocturna o invernal.

No obstante, no podemos dejar de decir que, como veremos en el capítulo siguiente, parece ser que algunos dinosaurios, en especial los más pequeños, sí pudieron tener algún metabolismo con capacidad de regulación de la temperatura corporal.

Bien, pues la segunda alternativa metabólica sólo podía ser la que permitiera hacer una vida complementaria a la de los que habían optado por la primera vía: actividad y resistencia. No sólo moverse para cubrir la necesidad de cada día, sino también, en un mundo amenazante, lleno de depredadores gigantescos, aprovechar cada oportunidad, cada momento. Había que estar en perfecto estado de revista cada segundo, atento y dispuesto a comer sin que te coman, a correr, a aparearse, a cuidar de la prole. Y esto sólo lo consiguieron aquellos animales que permanecían vitales e infatigables las veinticuatro horas del día. Aquellos cuyo metabolismo basal era lo suficiente activo como para estar con el gatillo preparado para disparar en un instante, en cada instante. No sólo tener un punto de máxima potencia sino tenerlo siempre, infatigablemente. Un metabolismo punta explosivo y un metabolismo basal a muchas revoluciones, exprimiendo al máximo las oportunidades energéticas del oxígeno. Hay muchos que opinan que no es casual la resistencia de estos pequeños animales en un mundo hostil, ligándola con la oportunidad que les iba brindando el incremento del oxígeno que se

inició en esta época, del que comentábamos unos párrafos más arriba. Así se podía sobrevivir siendo un pequeño animal en el Triásico o en el Cretácico, al abrigo de los dinosaurios. Y esto conllevaba un nivel energético alto, continuo, una sangre caliente con temperatura mantenida y controlada, un metabolismo trepidante, unas necesidades alimenticias importantes, una eficiencia en la transformación de materia en vida. Quemar energía sólo para obtener calor: la realidad es que el metabolismo de sangre caliente es diez veces más rápido por unidad de masa.

Había que esconderse de los depredadores, había que aprovechar los momentos en que los competidores gigantescos estuvieran aletargados por el frío de la noche, tenían que salir a buscarse la vida tras un periodo de entrenamiento en una infancia protegida y preparadora, llena de experiencias aprendidas de los mayores. Vida nocturna, oportunidades durante el frío, largo y oscuro invierno… sólo se podían gestionar con sangre caliente, con un metabolismo basal consistente. Así sobrevivieron los mamíferos. Quizás reminiscencia de aquella época y costumbres sean los hábitos nocturnos de los mamíferos murciélagos en competición por las oportunidades del aire y vuelo con las aves, hijas de los dinosaurios, diurnas.

La noche era su aliada, el clima frío era su aliado. El tamaño era su cortina de humo. Triunfaban aquellos que mutaban para aprovechar al máximo estos entornos para los que los dinosaurios no estaban preparados, ni falta que les hacía. Su debilidad fue la cuña por donde entraron los mamíferos.

Sangre caliente y unos sentidos preparados para la nocturnidad. Una capa pilosa que ayudaba a mantener la temperatura del metabolismo basal, unas glándulas sudoríparas que regulaban esta temperatura, vida nocturna en la que era fundamental un sensible sentido del olfato para identificar amenazas y oportunidades, una visión adaptada a las sombras de la noche sin demasiada necesidad de nitidez ni colores, apta para bajos índices de luminosidad. Un

tamaño diminuto con el que no tener grandes problemas para el cobijo. Un metabolismo activo para correr sin fatigarse. Una estructura de conductos respiratorios con los que respirar, jadear y correr, e incluso comer a la vez; para ello el diafragma, que no tenían los reptiles, ayudaba. Un aparato masticador y digestivo eficaz para optimizar la poca comida de forma que pudiera alimentar este metabolismo tan activo que les permitía sobrevivir sin competir. Numerosos artrópodos a su disposición, insignificantes para la mayoría de la fauna de gran tamaño.

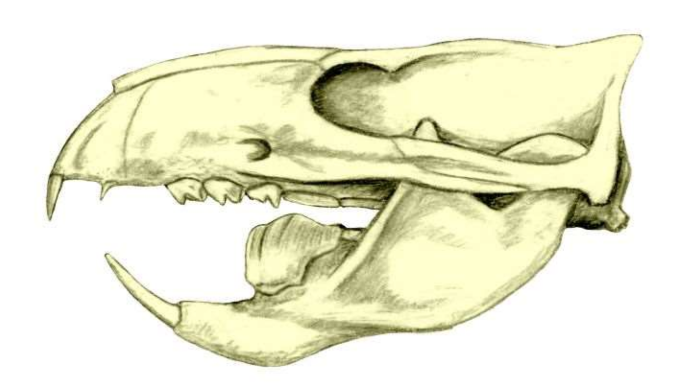
Así se transformaron los cinodontos mientras los dinosaurios medraban. Pequeños animales, ágiles, vivos y oportunistas. De todas formas, aún no se había alcanzado el salto evolutivo completo pues aunque les llamamos mamiferoides, con "*forma de mamífero*", no dejaban de ser todavía unos reptiles.



Representación artística de un Hadrocodium wui (Imagen: Mark A. Klinger, Carnegie Museum of Natural History, Science/AAAS, ver nota 3 a pie de capítulo, fair use)

No hay un gran registro fósil de estos pequeños animales con aspecto de mamífero. Un espécimen que podemos considerar próximo a los mamíferos basales del Mesozoico es el *Hadrocodium wui* que vivió en el Jurásico temprano, hace unos 195 millones de años. Era extremadamente pequeño, con una longitud de 3,2 centímetros y unos dos gramos de peso.[3]

Un poco más tarde aparecen los multituberculados, clasificados ya como mamíferos, de los cuales se conocen más de 200 especies fósiles datadas entre el Jurásico medio y el comienzo de la era siguiente, el Cenozoico. El nombre del grupo proviene de la estructura de los molares, con muchas cúspides (tubérculos), pero la dentadura se caracteriza además por un par de incisivos en la mandíbula inferior y ausencia de caninos. Tenían una constitución corporal semejante a las actuales ardillas.



Cráneo del murtitiberculado Ptilodus en donde se aprecia la potencia de sus piezas dentales (Wikimedia, GFDL 1.2)

Parientes próximos a los multituberculados fueron los triconodontos. Habitaron en casi toda la superficie terrestre del planeta a lo largo de un largo periodo, el comprendido entre el Triásico tardío y el Cretácico tardío. Su nombre proviene de que sus dientes presentaban tres cúspides, indicio de que eran usados para

moler el alimento. Eran muy pequeños, entre un gato y un ratón, y se alimentaban de insectos.

También parientes de los multituberculados son los haramíyidos. Contemporáneos de los triconodontos, alargaron su existencia un poco más, hasta principios de la era Cenozoica. Haremos mención a dos de sus especímenes de los que se han encontrado en China algunos de sus fósiles datados del Jurásico, entre 160 y 165 millones de años. Se trata del arborícola *Arboroharamiya* y del más primitivo *Megaconus*. El estudio de estos fósiles ha dado lugar a cierta indefinición sobre el origen de los mamíferos, aunque todo parece indicar que el origen de los verdaderos mamíferos podría situarse a finales del período Triásico, hace más de 200 millones de años.



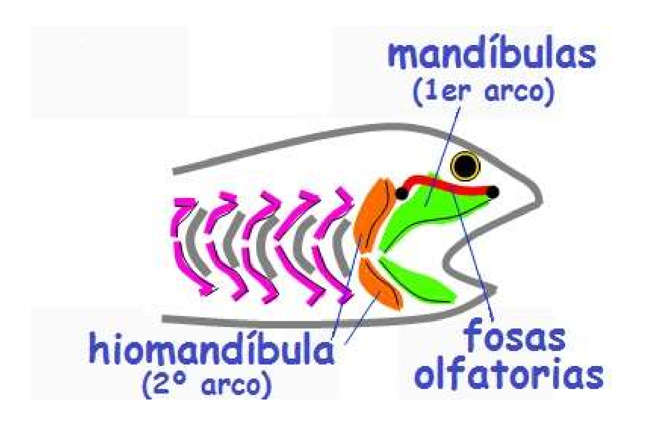
Representación artística del triconodonto Gobiconodon (Wikimedia, GFDL 1.2)

Las nuevas habilidades que iban consiguiendo los primitivos mamíferos eran fruto de modificaciones corporales. Andaban de forma más erguida, ya que las patas se situaron más verticalmente por debajo del cuerpo consiguiendo así un considerable ahorro energético durante el desplazamiento. Con esta disposición los mamíferos soportaban directamente el peso del cuerpo con las patas, lo que en grandes animales ofrecía una ventaja mecánica

considerable. Además, con las patas en posición ventral se podía abandonar el movimiento ondulatorio de la marcha reptil, lo que dificultaba el llenado de los pulmones con aire.

Los dientes, que inicialmente se usaban para sujetar y desgarrar la presa para luego tragarla entera, cambiaron para dar paso a dientes especializados, entre ellos los molares, con los que mejoraban la masticación de la comida, lo que facilitaba una rápida digestión. También desarrollaron un paladar secundario en el techo de la cavidad bucal, innovación que les permitía masticar y respirar al mismo tiempo.

En cuanto a su capacidad mordedora, la efectividad de su nueva mandíbula inferior "monopalanca" –de un solo hueso-, con la que la presión se efectuaba en los dientes y no en su articulación, se vio reforzada por una fosa temporal, por la que se les conoce como sinápsidos. Tal fosa se fue haciendo cada vez más amplia y situándose más cerca de la órbita ocular, con la que llegó casi a unirse, en donde se acomodaban los grandes músculos que movían la mandíbula inferior. Con ello se liberó al cráneo de colaborar en esta función, que a fin de cuentas le constreñía el tamaño, con lo que se le permitió el desarrollo craneal en volumen.

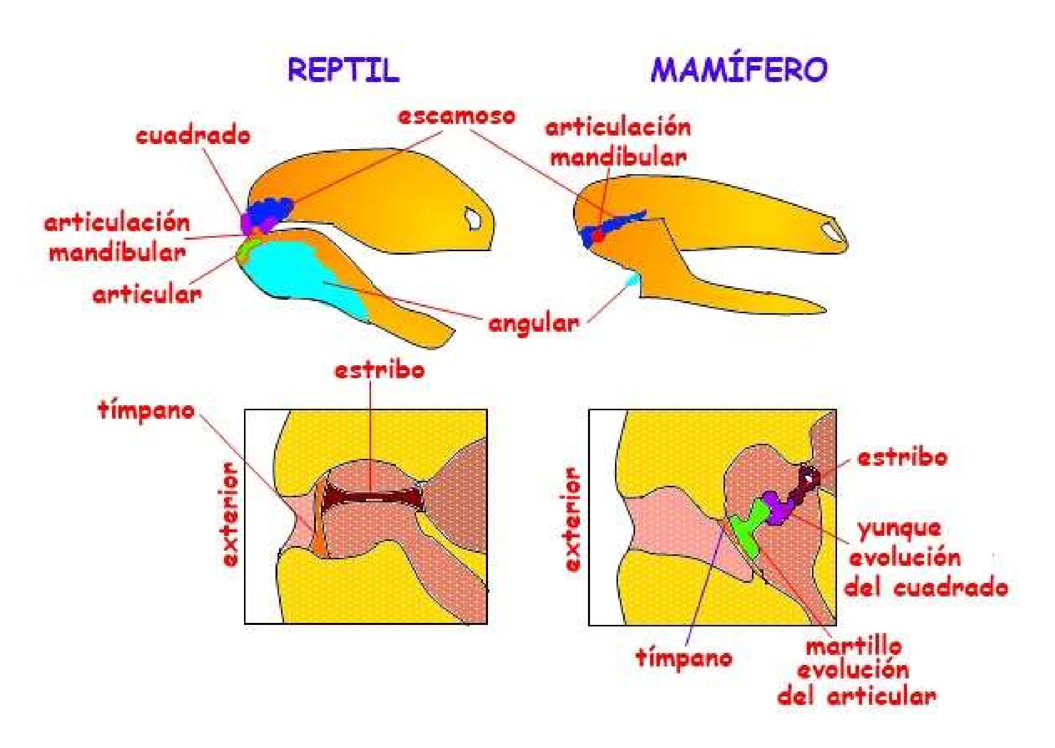


El efecto monopalanca de la mandíbula se había conseguido al disminuir su número de huesos comparándolo con la de los reptiles, llegando a estar formada por uno sólo. Recordemos del capítulo 29 dedicado al periodo Silúrico, como provenían de los huesos del primer arco branquial de los peces. Algunos de estos huesos

migraron hacia la parte posterior para desempeñar una función completamente distinta, como parte del oído medio.

El *estribo* es uno de los huesos del oído medio de reptiles y mamíferos, y se corresponde con el hiomandibular de los peces, una pieza que les sirve de soporte de la mandíbula con el cráneo.

El estribo en los primeros vertebrados terrestres podría haber tenido una triple función. Se trataba de un hueso denso y robusto, de modo que podría realizar una función de unión craneomandibular, a la par de colaborar con el sentido del oído y en la respiración. Cuando en el camino evolutivo de los mamíferos el cráneo perdió su elasticidad y la caja craneana se soldó, el estribo ya no fue necesario como elemento de soporte y utilizó su potencial evolutivo en dedicarse exclusivamente a la función auditiva.



Evolución de los huesos mandibulares y del oído de los reptiles a los mamíferos

Por delante del hiomandibular en los reptiles, anfibios y aves, y resultado de la evolución de la parte superior del ancestral primer arco branquial de los peces, se encontraban los huesos cuadrado y

articular, que efectivamente constituían la bisagra que articulaba ambas mandíbulas. Con el paso del tiempo esta articulación se fue desplazando hacia delante, hacia el hueso dentario o mandíbula inferior, transformándose el hueso cuadrado en el *yunque* del oído medio de los mamíferos, y el articular en el *martillo*. La hendidura entre los dos primeros arcos pasó a formar la trompa de Eustaquio.

La audición mejorada permitía a los cinodontos relacionarse mejor con su ambiente, lo que se habría desarrollado a la par que la mejora en la capacidad cerebral para procesar el cúmulo de información auditiva al que tenían acceso.

Además de un sistema auditivo desarrollado, los mamíferos disponían de un olfato privilegiado que también les servía para manejarse en su entorno nocturno habitual, así como para reconocerse gracias al desarrollo de nuevas glándulas odoríferas. La cobertura de pelos ayudaba a este propósito. Este sentido debió ser muy importante para los mamíferos, e incluso hay estudios que proponen que fue el olfato el que espoleó la evolución de cerebros complejos en estos animales.[4]

Estos estudios también especulan sobre la influencia del pelo corporal en el desarrollo del tamaño del cerebro. Por el análisis de los fósiles de *Castorocauda lutrasimilis,* un pequeño animal mamaliaforme de costumbres semiacuáticas, sabemos ya de la existencia de estas excrecencias de queratina hace unos 164 millones de años. Los pelos sirvieron inicialmente, además de para regular la temperatura corporal, como pequeños sensores que orientaban el movimiento, permitiendo a estos animales circular con seguridad a través del accidentado terreno y evitar daños en la oscuridad. El control de la gran cantidad de información generada bien pudo estimular el desarrollo de sus redes neuronales.

Un mejor olfato, un mejor oído, un mejor tacto, una mejor coordinación motora, en fin, una mejora en la habilidad de producir movimientos musculares diestros usando los sentidos, además de la

atención en el cuidado de sus crías, desembocó finalmente en la formación de campos sensoriales intrincados en el neocórtex de los mamíferos, es decir, promovieron el desarrollo de su cerebro y de sus capacidades.

Las glándulas de la piel no sólo servirían para su función original, dar señales odoríferas, sino que evolucionaron más tarde para poder regular también el calor vía la sudoración e incluso, tras una especialización, a segregar líquido alimenticio para las crías, transformándose en las glándulas mamarias específicas de esta clase de animales.

Llega el momento de tener que dejar a los mamíferos del Jurásico, ya una realidad en el árbol genealógico del reino Animalia. El capítulo que sigue continúa en los dominios de este periodo geológico y lo vamos a dedicar a los grandes protagonistas del momento, los dinosaurios.

NOTAS DEL CAPÍTULO 40:

1. Más detalles en esta reseña "*Prehistoric pollination: sawfly mouthparts fit tubular channels of gymnosperm cones*" de la web del Smithsonian Museum de noviembre de 2009, y en el estudio original "*The Pollination of Mid Mesozoic Seed Plants and the Early History of Long-proboscid Insects*", Conrad C. Labandeira publicado en Annals of the Missouri Botanical Garden de 2010.
2. "*The oldest known snakes from the Middle Jurassic-Lower Cretaceous provide insights on snake evolution*", Michael W. Caldwell et al. (enero 2015). Más información en una publicación de la revista Nature de enero de 2015.
3. Una mayor información en la publicación de AAAS, "*Science: Sniff Sniff: Smelling Led to Smarter Mammals*" de mayo de 2011.

4. En la publicación de la revista Science de mayo de 2011 podéis encontrar más información al respecto. "*Fossil Evidence on Origin of the Mammalian Brain*", Timothy B. Row et al. (mayo 2011).

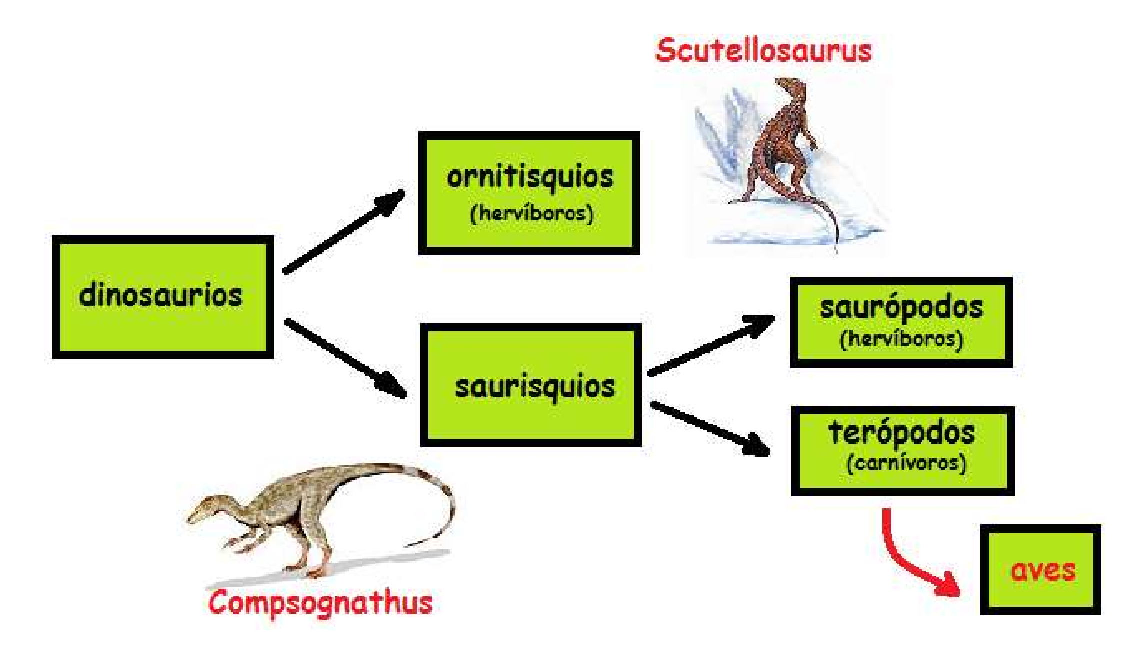
41. Grandes dinosaurios

En el capítulo anterior conocimos los principales acontecimientos que le sucedieron a nuestro planeta en un momento en que se iniciaban profundos cambios geológicos, que a la postre le llevaron a la configuración actual de continentes. Vimos cómo se alteraban las condiciones atmosféricas y climáticas, entorno en el que se movía pausadamente su biosfera. Nos centramos en dos de sus más destacados actores, dinosaurios y mamíferos, intentando comprender qué les hacía diferentes entre sí y por qué. En este capítulo continuamos la historia centrando el argumento en los carismáticos dinosaurios, con lo que completaremos prácticamente el Jurásico, periodo que bascula entre 200 y 145 millones de años antes de hoy. En un capítulo posterior desarrollaremos todo lo concerniente a su conquista del medio aéreo, que se produjo entre este periodo y el siguiente.



Mientras los mamíferos raramente excedían el tamaño de un gato, aunque a decir verdad su tamaño se asemejaba más al de un roedor depredador de pequeñas presas, los dinosaurios experimentaron casi todas las alternativas vitales posibles: todos fueron animales terrestres a excepción de los ancestros de las aves, sus tamaños

variaban desde pequeños a gigantescos, fueron herbívoros o carnívoros, algunos practicaron originariamente el bipedismo, aunque otros anduvieron siempre a cuatro patas, la mayoría tuvieron sangre fría pero alguno, en especial los conectados con las aves, parece que eran de sangre caliente, unos eran rápidos y otros de pasos lentos y seguros. Ahora bien, no todos los grandes animales de la época fueron dinosaurios. Ni los cocodrilos, ni los pterosaurios voladores, ni los grandes reptiles acuáticos lo eran: sólo los que llevaban en su pasaporte la denominación de arcosaurios ornithodiras dinosauriformes. *Sólo aquellos arcosaurios que desarrollaron una serie de cambios anatómicos relacionados entre sí y que en su mayoría revolucionaron su capacidad de marcha*, generalmente siguiendo el esquema general de bipedismo heredado del reptil que fue su ancestro.

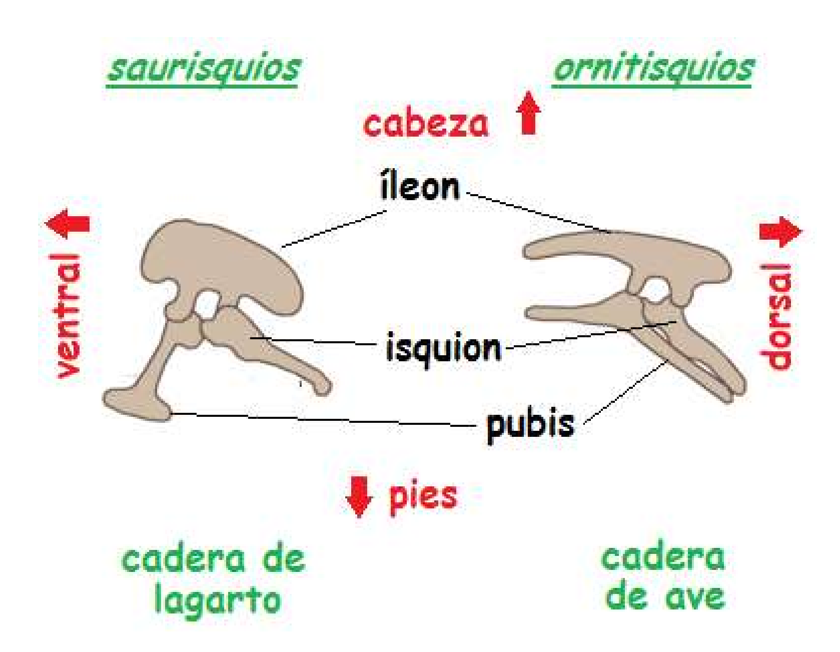


Clasificación de los dinosaurios

Basándonos en la anterior característica los clasificamos en dos grandes órdenes, como se muestra en la figura siguiente: los **ornistisquios** y los **saurisquios**, que se diferenciaban casi exclusivamente en la disposición de su cadera, cuyos huesos son parte fundamental en la cadena de soporte y transmisión del movimiento. Los primeros de esta clasificación se presentan con

"*cadera de ave*", y los segundos, con "*cadera de lagarto*". De estos últimos evolucionaron las aves, a pesar de lo que su nomenclatura parece insinuar.

Una de las principales características de los dinosaurios, con alguna excepción, es la propiedad de caminar en posición erguida. Esa habilidad provenía ya del reptil en la base del clado, pero en ellos se mejoró la eficiencia de este tipo de marcha, lo que se consiguió al mudar el entronque de las patas con el cuerpo, que se situaron en posición perpendicular *por debajo* del cuerpo, como los mamíferos, y no hacia los costados como en la mayor parte de los reptiles. Y esto se consiguió modificando la cadera. En todos los tetrápodos está generalmente compuesta por una serie de huesos que forman una especie de copa en la que queda protegido el intestino delgado, pero su función principal es que sirve de soporte estructural para el animal, ya que a través de ella se transmite el peso del cuerpo al fémur, primer hueso de las extremidades inferiores. En esta estructura está además la articulación en la que bascula el movimiento de la pata y la atadura muscular motora de este hueso.



Tipos de cadera de los dinosaurios (a partir de Wikimedia, GFDL 1.2)

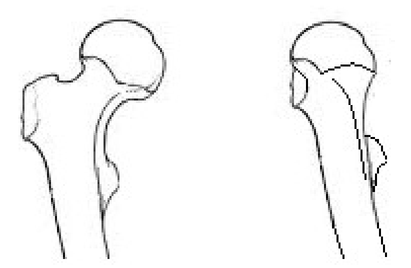
En los dinosaurios el hueso anteroinferior de la cadera, el pubis, evolucionó hacia dos morfologías distintas: con proyección hacia adelante, como en los mamíferos, o hacia atrás, como en las aves. Cada una de estas disposiciones clasifica a las dos grandes "familias" (propiamente órdenes) de dinosaurios. Además, el fémur, que presenta una disposición vertical con respecto al cuerpo, evolucionó su engarce con la cadera hacia una articulación horizontal en ángulo recto.

El camino hasta aquí había sido largo. Los primeros arcosaurios tenían las patas abiertas a los lados del cuerpo, como los lagartos actuales, adoptando una postura agachada. Caminaban siempre con las rodillas y tobillos en ángulo recto lateral, por lo que al moverse no les quedaba otro remedio que oscilar el cuerpo de un lado para otro, reminiscencias de su antigua vida de peces. A mediados del Triásico ya habían adoptado una postura semiagachada, con la articulación del fémur un poco más ventral, aunque no muy diferente a la anterior. Ello les permitió elevar el cuerpo, haciendo la marcha más cómoda y rápida, entre otros motivos por disminuir el rozamiento del vientre con el suelo.

A finales del Triásico tanto la rama de los cocodrilos como la de los dinosaurios habían adoptado ya una marcha erguida, con las extremidades siempre debajo del cuerpo. Los primeros, los cocodrilos, con una disposición tal del fémur y su articulación con la cadera que hacía que sus patas adoptaran una postura totalmente vertical bajo el cuerpo. En cambio, los dinosaurios habían evolucionado hacia un fémur y articulación en ángulo recto, como ya se ha comentado, similar a la de los mamíferos.

Esta posición es energéticamente más eficaz, ya que no tienen que gastar ningún esfuerzo en mantener el cuerpo separado del suelo sin arrastrarlo. Por contra, la postura era menos estable, lo que la selección natural contrarrestó con una cadera potente en donde se afianzaban unos músculos fuertes que sujetaban y equilibraban las

extremidades. El mecanismo de retroalimentación del equilibrio posiblemente fue otro estímulo para el crecimiento cerebral.



Tipos de estructura del fémur. La cadera de los dinosaurios evolucionó hacia la de 90º (izquierda) a partir de la recta de los reptiles (derecha).

A las anteriores modificaciones se les unieron otras complementarias: La articulación de la rodilla pasó de una posición lateral a una inferior, recta, debajo de la articulación de la cadera, por lo que pasó a tener un movimiento anteroposterior; La rotación de los tobillos adoptó también un movimiento semejante. Con ello los miembros se movían paralelos a la columna vertebral y en una posición casi vertical, ayudando también a la agilidad de la marcha.

Las modificaciones corporales que acabamos de comentar unifican a los miembros de los dinosaurios. No obstante, sobre ellos se abren una serie de discusiones relacionadas con su metabolismo y costumbres.

La más paradigmática quizás es la que especula acerca de su posible condición de poseedores de un metabolismo de sangre caliente. A lo largo de los últimos años (y no tan últimos) se han desarrollado múltiples teorías y controversias, aunque en la actualidad se converge en la idea de que los pequeños terópodos avanzados, muy próximos ya a las aves, tendrían esta característica, que por otra parte resultaba imprescindible para el movimiento de aleteo, que exige un consumo energético elevado. El resto serían de sangre fría, aunque algunos habrían desarrollado, en un camino evolutivo hacia el metabolismo conocido como de sangre caliente, una especie de

pilosidades que, además de poder ser utilizadas como antenas sensoriales, podrían servir para regular la temperatura.

Sin embargo, sorprende que estos grandes saurios pudieran soportar climas fríos o requerimientos energéticos altos siendo de sangre fría, característica que apunta a metabolismos muy lentos.

Quizás lo que parece una incongruencia se explique parcialmente con la relación gigantismo-temperatura. El hecho de tener un tamaño gigantesco habría desarrollado en los dinosaurios que lo poseían algún tipo de regulación térmica especial. Pensemos que al incrementar el tamaño de un cuerpo, su masa, que es donde se genera el calor metabólico, varía con el cubo del factor de escala (x^3), mientras que la superficie corporal, que es por donde se regula y pierde el calor, aumenta sólo con el cuadrado (x^2). En los cuerpos pequeños o medianos esto no debe ser un problema, pero con el crecimiento se puede llegar a un factor de escala por encima del cual los cuerpos, literalmente, se abrasarían en sus propias ascuas. Ahora bien, hay un punto intermedio que también puede ser provechoso para los animales de metabolismo lento, de sangre fría. Y tiene que ver con el hecho de que el calor corporal puede controlase también a través de las bajas temperaturas que se producen por la noche.

Es el proceso inverso, aunque térmicamente semejante, al que practica cualquier reptil que necesita exponerse por las mañanas al sol para ganar las calorías que relancen su metabolismo frenado por el frío de la noche. En la caída del sol, un animal de gran volumen sobrecalentado por la actividad diurna, a medida que se adentra la noche, experimentaría un proceso de enfriamiento gradual del cuerpo con la bajada de temperatura ambiente, modulado con una inercia, un retraso. Puede ser que el retraso sea suficiente como para que a lo largo de la noche se mantenga un cierto calor corporal, de forma que con la salida del sol aún se tenga una temperatura elevada, lo que reflejaría una situación muy semejante al que produce el metabolismo rápido de los animales de sangre caliente. La consecuencia que se puede deducir de ello es que, a pesar de que los

dinosaurios más voluminosos pudieran tener un metabolismo de sangre fría, un metabolismo basal bajo, en cierta medida se podrían comportar como animales de sangre caliente. Cuanto mayor sea la inercia, más se retrasará el enfriamiento nocturno y disminuirá también la velocidad de calentamiento diurno, de forma que algunos dinosaurios podían tener una variación de temperatura corporal a lo largo del día de tan sólo unos 2 o 3 grados. Una regulación por inercia térmica que haría una función equivalente a la regulación por metabolismo de los mamíferos.

En 2012 se reportaron los resultados de unas investigaciones [1] que parecen aportar datos que pudieran poner un grano de arena más a favor de los que cuestionan la condición de que la mayoría de dinosaurios fueran animales de sangre fría. Uno de los principales argumentos para defender esta tesis venía de la existencia de las *líneas de parada de crecimiento* de los huesos. Estas líneas son, al igual que los círculos de crecimiento en los árboles, un indicativo de cambios de condiciones climáticas o de hábitos de los animales que siempre se habían asimilado a los de sangre fría. Y marginalmente, a alguno de sangre caliente con ciclos de hibernación.

Se suponía que se producía un paro estacional de crecimiento cuando el animal, en momentos de poca abundancia de recursos, era incapaz de mantener constante su temperatura corporal. Pero se ha descubierto, rompiendo lo conocido hasta la fecha, que este tipo de discontinuidades en el crecimiento de los huesos es también muy común en algunos animales de sangre caliente. Con ello no se invalidaría la idea de que los dinosaurios fueran de sangre fría en su mayoría, aunque sí se debilita un pilar fundamental de la tesis.

Otro estudio publicado en 2005 acerca de las tasas de crecimiento del dinosaurio *Plateosaurus engelhardti* y la incidencia de ello en sus huesos, parece que permite asegurar que esta especie personifica una etapa primitiva en el proceso de la endotermia. Vivió durante el Triásico tardío lo cual indicaría una fecha muy temprana para la aparición de este tipo de metabolismo.[2]

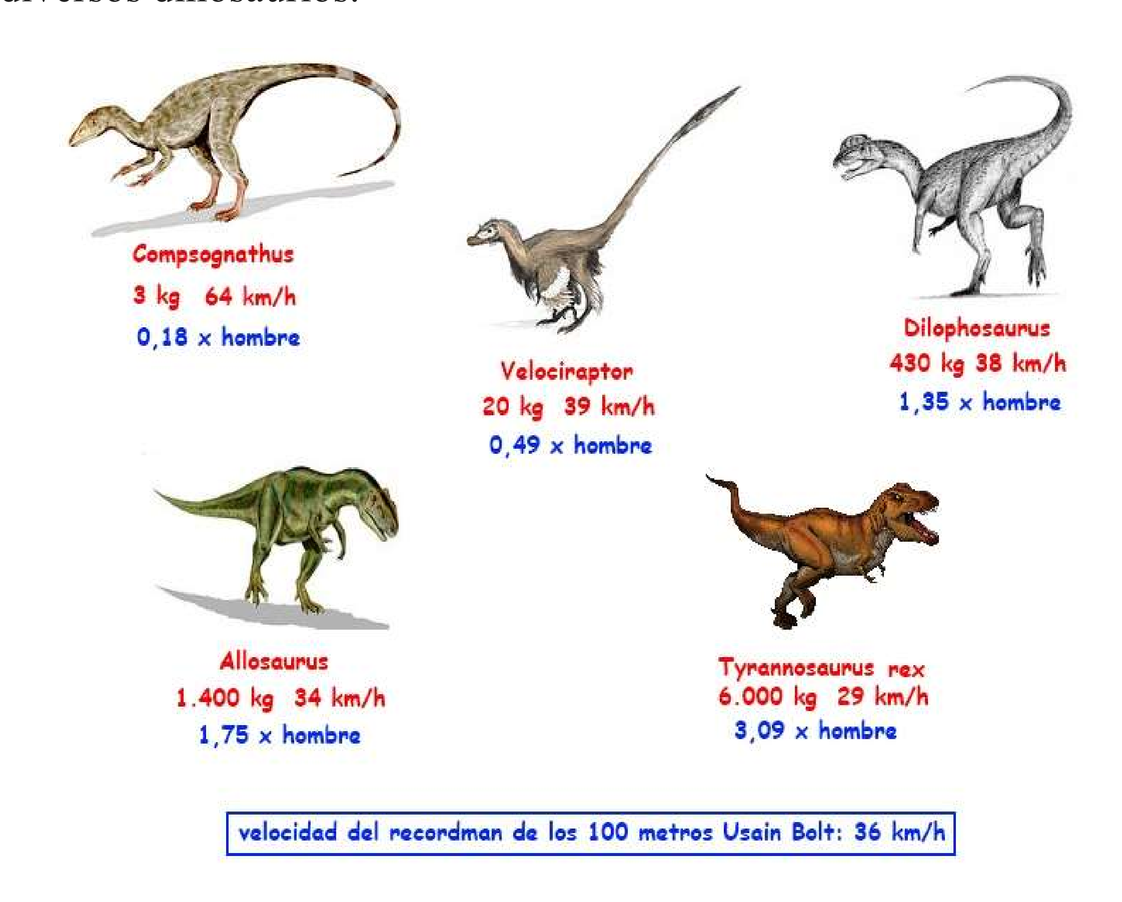
Quizás pudiéramos estimar en un grado cualitativo el tipo de metabolismo de los dinosaurios, si caliente o frío, analizando su capacidad de correr y las velocidades que pudieran alcanzar, con la idea de que es lógico pensar en una proporcionalidad entre velocidad del paso y metabolismo. Hay que adelantar que los resultados alcanzados en diversos estudios no han aclarado la controversia entre biólogos endodérmicos, sangre caliente, y ectodérmicos, sangre fría.

Los cálculos se hacen en base al análisis de la geometría de las variadas huellas fosilizadas que se han encontrado. Comenzando por los estudios [3] realizados ya en 1976 por el zoólogo inglés McNeill Alexander, quién dedujo una fórmula que ajusta con bastante exactitud para todos los vertebrados la longitud de la zancada con la de la extremidad que la realiza, hasta modernos análisis dinámicos mediante modelos que robotizan la anatomía de los animales estudiados como el realizado [4] por los profesores de la universidad de Manchester William Irvin Sellers y Phillip Lars Manning en 2007.

Todos llegan a condiciones generales muy homogéneas: generalmente los dinosaurios con menor masa corporal son los que debían alcanzar una mayor velocidad punta absoluta durante la marcha. Hasta cierto punto es una conclusión lógica, al menos en lo que se refiera a los animales voluminosos, ya que tiene que haber algún límite en la resistencia de los huesos frente al estrés del "golpeteo" en el trote o el galope: un mayor peso corporal supone unos mayores esfuerzos dinámicos que se incrementan al aumentar la velocidad de marcha.

Lo anterior refuerza la idea de que pudo ser que en los dinosaurios pequeños se iniciara la evolución hacia animales de sangre caliente, circunstancia que aprovecharon aquellos que más tarde consiguieron volar, los ancestros de las aves.

Como curiosidad, en la figura siguiente se apuntan los resultados del mencionado estudio de los profesores de la universidad de Manchester, Sellers y Manning, sobre las posibles velocidades de diversos dinosaurios.

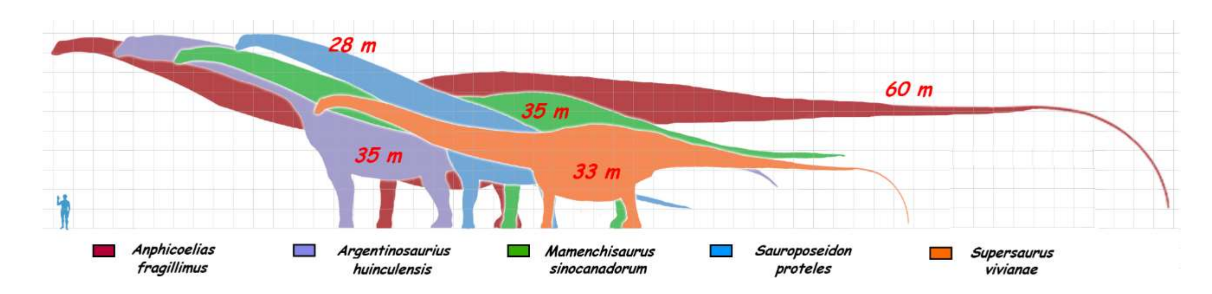


En azul, la proporción entre la longitud de la extremidad de cada uno de los dinosaurios y la del hombre (imágenes a partir de wikimedia, GFDL 1.2)

En esta figura, si modulamos las velocidades estimadas para cada una de las especies de dinosaurios teniendo en cuenta la relación de la longitud de extremidades con la del hombre, nos podemos hacer una idea más próxima de si las velocidades que podían desarrollar eran grandes o moderadas. A fin de cuentas para cualquier comparación contamos con el estándar que nos da las condiciones de nuestro cuerpo, tanto en geometrías como en tiempos. A la vista de esto, el pequeño *Compsognathus* debía ser veloz como el viento (de hecho desarrollaría la velocidad equivalente a la del galgo)

mientras que el gigante *Tyrannosaurus rex* marcharía con un ritmo semejante al del oso polar, o haciendo una abstracción según longitudes de extremidades a unos 10 km/h-equivalente hombre, no muy rápido, sin duda.

Pasemos ahora al tema del gigantismo. Lo primero que hay que decir es que no todos los dinosaurios tenían un cuerpo desmesurado, los había del tamaño de una gallina, aunque por lo general podemos decir que tendrían un tamaño un orden de magnitud superior al de los otros vertebrados coetáneos. Aunque sus fósiles se han perdido, se supone que el mayor conocido hasta ahora es el *Amphicoelias fragillimus*, de finales del Jurásico, con una longitud de entre 40 y 60 metros, una altura de 21 y un peso aproximado de unas 135 toneladas, el mismo de 15 elefantes juntos. Le seguiría en tamaño el *Argentinosaurius*, del que sí se tienen buenas evidencias, que vivió en el siguiente periodo, el Cretácico, con un peso de unas 90 toneladas y una longitud de 40 metros. Sus vértebras tenían una longitud de 1,3 metros y la tibia alrededor de 1,6 metros.



Los dinosaurios más grandes conocidos (Wikimedia, GFDL 1.2)

El gigantismo tiene un inconveniente que lo debería limitar. Usando el mismo camino argumental al que acudíamos al hablar de la inercia térmica de los dinosaurios, somos capaces de entender el punto crítico al que se llegaría cuando la masa corporal crece al cubo del factor de escala mientras que la sección ósea que asegura la resistencia estructural se incrementa al cuadrado del factor de escala. Y el punto crítico es aquel a partir del cual el hueso colapsará bajo el peso del cuerpo. Pero hay otro problema más sutil. La masa, y por tanto el metabolismo, se incrementa x^3, mientras que la sección de

las arterias y venas que llevan oxígeno y alimento a las células y les retiran los residuos innecesarios y tóxicos, se incrementa sólo x^2. Problema físicamente igual a lo comentado unos párrafos más arribas sobre el mantenimiento del calor corporal de los grandes dinosaurios. A medida que el margen de seguridad se va agotando no queda más remedio que rebajar el metabolismo: proporcionalmente menos alimento, menos oxígeno y vida más larga pero menos activa. O de forma más poética, como define el periodista norteamericano George Johnson, los corazones de todos los animales darán los mismos latidos a lo largo de sus vidas: la diferencia es que los pequeños se dan más prisa para ello.

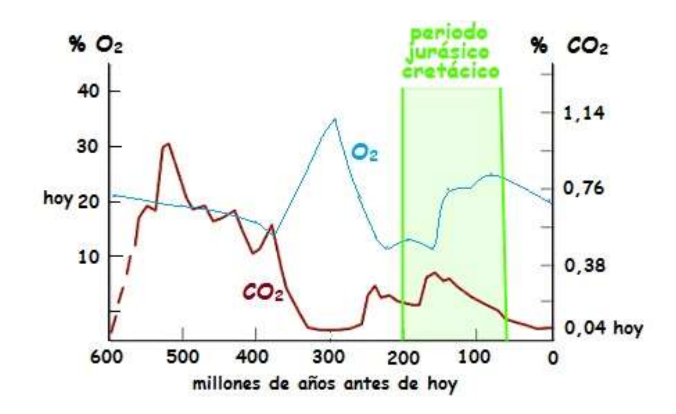
Hay innumerables estudios sobre el tema, de los que quiero destacar el que pudo ser el inicial, del suizo Max Kleiber, quién hacia 1930 dedujo y propuso lo que luego quedaría como su famosa ley, que establece que para la mayoría de organismos, ya sean animales o plantas, el logaritmo del metabolismo basal (energía diaria que necesita un organismo) es proporcional al logaritmo de su masa corporal, siendo esta tasa de proporcionalidad de 3/4. El metabolismo basal crece a menor ritmo que la masa.

Volvamos al gigantismo particular de los dinosaurios. El hecho de que las grandes morfologías en ellos hayan sido viables durante millones de años, mucho más tiempo que el que ha durado la existencia de otras especies que consideramos exitosas como el *Homo*, indica que estaban muy bien adaptadas a sus ambientes.

De todas formas, por aquella época el gigantismo no era sólo patrimonio de los dinosaurios. Los ictiosaurios pudieron llegar a los 23 metros. Los plesiosaurios más grandes tenían las mandíbulas de tres metros de largo, y pudieron haber alcanzado más de 15 metros de longitud, pesando más de 10 toneladas. En Inglaterra se han encontrado vértebras y dientes que pueden pertenecer a especímenes de 22 metros de largo y que quizás pesaban 20 toneladas. Y algún pterosaurio pudo medir más de diez metros de envergadura, así

como los cocodrilos fitosaurios que podían medir también más de diez metros.

¿Por qué pudieron producirse estos crecimientos desmesurados? Hay teorías para todos los gustos, pero la más aceptada parece estar relacionada con los índices atmosféricos de oxígeno durante el Jurásico y Cretácico. Y veremos que hubo suficiente materia y energía, o lo que viene a ser lo mismo, carbono y oxígeno para crecer.



Una gran participación del oxígeno en la composición de gases atmosféricos hace que la presión parcial del mismo sea superior, y por tanto sea más fácil la difusión del O_2 en los tejidos orgánicos. Ya comentamos el espectacular tamaño de las libélulas del Carbonífero, que lo atribuíamos a la superabundancia de este gas. En los insectos hacía posible que penetrasen a través de tráqueas más largas, y en los animales respiradores pulmonados hace que la transferencia de este gas hacia la sangre sea mayor y que por tanto haya más oxígeno disponible para el metabolismo. Hay que recordar que el oxígeno, entre otras funciones, es el receptor final en la cadena de electrones base en la generación del ATP, verdaderas pilas de energía en los procesos biológicos animales. A mayor energía, un metabolismo más activo y una consolidación superior de los alimentos. La consecuencia fue un mayor tamaño corporal. No pasó con todos los animales de la época, lo cual no es de extrañar ya que la selección natural no tiene preferencias y condiciona y tutela cualquier tipo de estrategia viable.

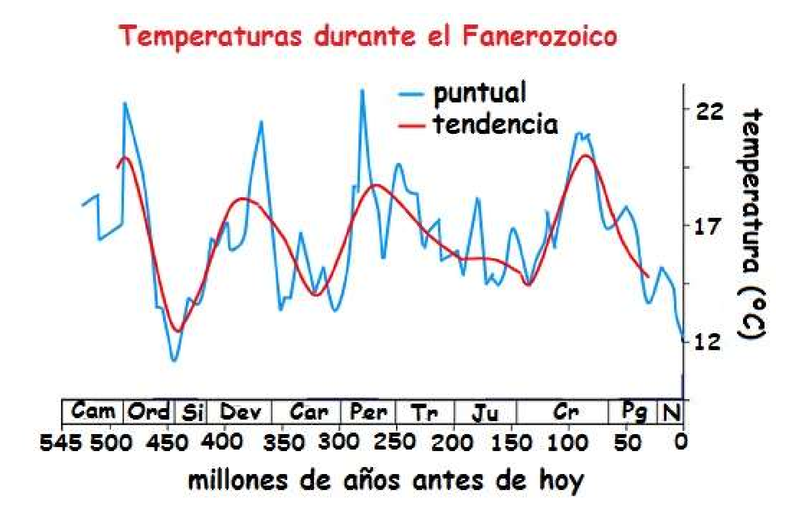
Pero es que hay más relacionado con las condiciones atmosféricas. En la curva anterior podemos ver que también los niveles de CO_2 fueron elevados durante el Jurásico (aunque luego decayeron en el Cretácico). Ya sabemos que debía ser consecuencia de la gran actividad geológica y volcánica del momento. Esto, más la recuperación del clima húmedo, pudo dar alas al mundo vegetal. Sabemos también que progresivamente iban volviendo los bosques húmedos y tropicales, y que el clima benigno favoreció la extensión de las plantas hasta latitudes elevadas. Sin dudas la función clorofílica incrementaría su volumen y quizás eso fuera lo que propulsó las altas concentraciones de oxígeno. No importa cuales fueran las causas: la realidad es que las plantas crecieron en tamaño y extensión, aportando a sus organismos mayores cantidades de carbono que alterarían la proporción de este elemento con el nitrógeno en perjuicio de este último, que lo tenían que conseguir a través de una compleja química en sus raíces.

Es una obviedad el decir que los animales necesitan alimento. Pero es que es cierto que los dinosaurios, muchos de ellos herbívoros, comerían plantas para satisfacer, entre otras, sus necesidades de nitrógeno. Plantas sobrecargadas de carbono, ¿qué tal si la relación de C/N fuera 2/1 en vez de 1/1? Pues que los dinosaurios, y en general todos los herbívoros, habrían asimilado el doble de carbono del que necesitaban. La consecuencia fue un embolsamiento de carbono en el organismo, y eso ya sabemos que se hace en forma de grasas, azúcares y proteínas, entre otros, las bases de la masa orgánica de un cuerpo. Y a mayor tamaño, más necesidad de alimento y más almacenamiento de carbono. La competencia por la comida debió ser fuerte a pesar del incremento de las masas vegetales. Quizás fuera esto lo que favoreció algunos cuellos tan largos que permitían acceder a espacios con hojas inalcanzables para otros.

Lo que nos posibilita plantear una curiosa teoría sobre estos animales.

Después de lo dicho acerca de los grandes dinosaurios podemos imaginar que debían tener un estrés alimentario importante: Grandes volúmenes corporales, necesidad de mucho alimento vegetal aprovechándose cualquier cosa masticable, conductos digestivos largos, potentes estómagos rellenos de bacterias digestoras que fermentaban las masas ingeridas, digestiones pesadas, muchos gases y metano…

Y eso, ¿qué tiene que ver? Para verlo retomamos una vieja y conocida curva.



Evolución de la temperatura durante el Fanerozoico

Como podemos ver en la figura anterior, en la primera mitad del Cretácico hubo un rebote de las temperaturas globales con un cambio hacia valores más elevados. En un capítulo posterior, el 43 titulado *“El Cretácico y sus plantas*”, haremos una descripción más detallada de cuáles pudieron ser las causas. Aquí sólo apuntamos el hecho.

Los fisiólogos británicos David Wilkinson y Graeme D. Ruxton, en colaboración con Euan Nisbet, profesor de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Londres y experto en gas metano, han presentado un estudio en 2012 [5] de sobre la ecología de los grandes saurópodos planteándose la siguiente hipótesis: estos animales podrían haber producido, como lo hacen las vacas modernas, más metano que el

conjunto de todas las fuentes actuales, tanto naturales como antropogénicas.

Según esta opinión, los saurópodos habrían emitido unos 520 millones de toneladas de metano al año, cifra comparable a la de las emisiones modernas. Antes de la revolución industrial, las emisiones de metano eran de unos 200 millones al año. Los animales rumiantes modernos producen un total de entre 50 y 100 millones de toneladas por año. Así que bien pudieron ser los dinosaurios unos importantes corresponsables del calentamiento global del Cretácico.

Y un último apunte de estos sorprendentes animales. De los restos fósiles se puede inferir un probable comportamiento social de los dinosaurios. Se han encontrado nidadas de huevos en donde coincidían huesos de animales jóvenes y de adultos. La explicación que se da a este escenario tan alejado del de los reptiles es que mayores y pequeños convivían un determinado periodo de tiempo en grupo, lo que demostraría la existencia de un periodo de cuidado y atención de los padres sobre sus crías, como sucedía en el caso del *Maiasaura*. También la disposición y vecindad de varias nidadas parece sugerir que algunas especies de dinosaurios vivían en grandes agrupaciones semejantes a las que forman en la actualidad los pingüinos. De la observación de algunas trazas fósiles del caminar de estos animales se ha constatado que algunas especies como el *Hadrosaurus* se desplazaban en grandes manadas formadas por individuos adultos y jóvenes. Incluso algunas trazas parecen indicar que en estos grupos los más jóvenes quedaban protegidos en el interior del cordón externo que formaban los adultos. Se han encontrado muchos yacimientos en donde se mezclaban fósiles de múltiples individuos lo que parece indicar que la catástrofe que los enterró sorprendió a una agrupación social. Hay también serias evidencias de que algunos de ellos, como el pequeño *Velociraptor*, cazaban en grupo.

Lo que hemos visto en este capítulo hace pensar que los dinosaurios fueron un grupo de animales con algo especial. Parece que en la

clasificación taxonómica quedan inmersos y diluidos en el gran grupo de la clase saurópsida, cuando manifiestan unas características tan especiales que ya por ellos mismos deberían constituir una clase independiente, como así lo hacen sus hermanos los mamíferos y reptiles, y aún más ¡sus hijas las aves! El hecho de haber desaparecido hace unos 65 millones de años puede que haya infravalorado una realidad filogenética.

De esta desaparición hablaremos cuando llegue su momento. En el capítulo que sigue continuaremos su historia a caballo entre el Jurásico y el Cretácico, que es cuando nuevas habilidades les llevaron a conquistar los cielos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 41:

1. Realizadas por Meike Köhler et al, en colaboración con investigadores del Institut Català de Paleontologia, que podéis encontrar en esta publicación, "*Seasonal bone growth and physiology in endotherms shed light on dinosaur physiology*", de la revista Nature de junio de 2012.

2. "*Developmental Plasticity in the Life History of a Prosauropod Dinosaur*", P. Martin Sander y Nicole Klein. Más información del tema en esta publicación de la revista Science de diciembre de 2005.

3. Publicación de la revista Nature de abril de 1976 en donde se reseña el trabajo comentado. "*Estimates of speeds of dinosaurs*", R. McNeill Alexander.

4. "*Estimating dinosaur maximum running speeds using evolutionary robotics*", William Irvin Sellers y Phillip Lars Manning. Publicad en The National Center for Biotechnology Information de noviembre de 2007.

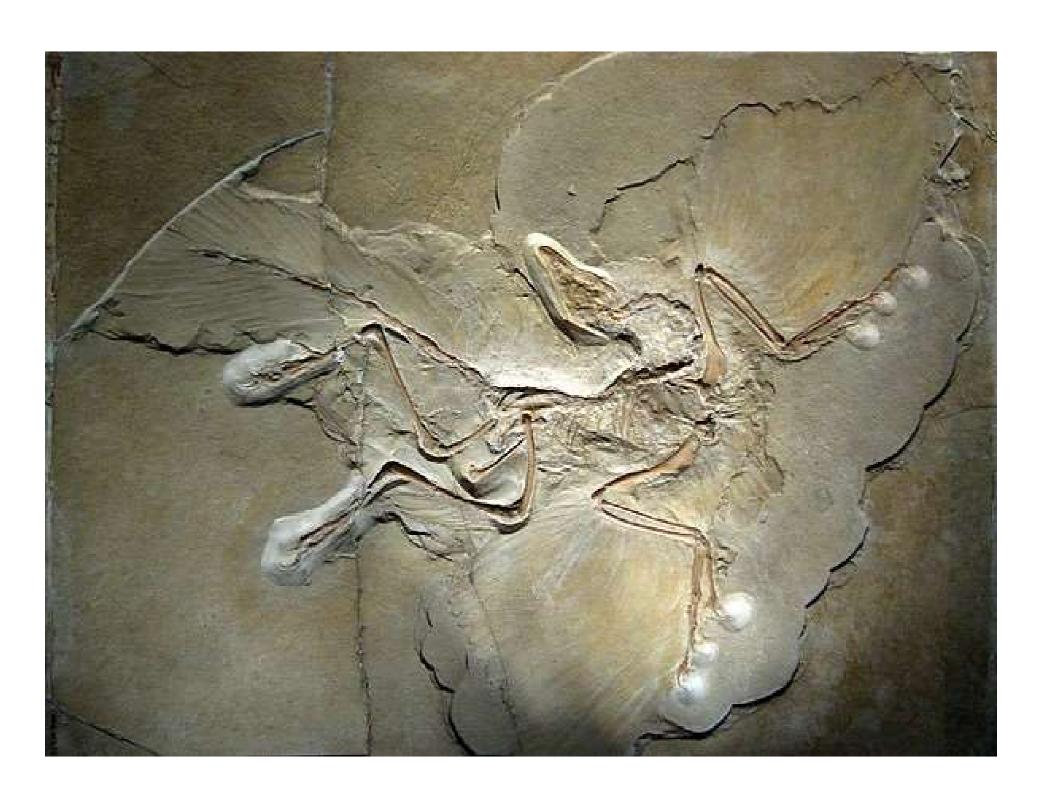
5. "*Could methane produced by sauropod dinosaurs have helped drive Mesozoic climate warmth?",* David M. Wilkinson et al., publicado en ScienceDirect de mayo de 2012.

42. De los dinosaurios voladores a las aves

En los siguientes párrafos vamos a tratar un tema con el que completaremos el periodo Triásico, pero que se extiende en casi su totalidad sobre el siguiente, el Cretácico. Me voy a tomar la licencia de adelantarlo aun sin haber introducido la geología y climatología de este último periodo como ha sido habitual para los demás vistos hasta ahora. El motivo es que el tema complementa y cierra el círculo de lo iniciado en el capítulo anterior sobre los dinosaurios, de forma que hablaremos de cómo estos animales tan especiales conquistaron el cielo, más allá de lo que hacía mucho tiempo habían hecho los insectos, y un poco menos los reptiles Pterodáctilos.



Comencemos por el final. Los grandes dinosaurios nos llevan de la mano hasta el pequeño *Archaeopteryx*, el "ala antigua", la última maravilla del Jurásico: ¿Es un dinosaurio? Quizás. ¿Es un ave? Posiblemente. La verdad es que es el eslabón que une el clado reptil con una nueva clase animal. Un clado es el conjunto de especies e individuos que provienen de un antepasado común. Taxonómicamente, es decir, en la ciencia de la clasificación, a *Archhaeopteryx* se le conoce como un ave. Quizás la primera de todas ellas.



Fósil de Archaeopteryx del museo de la Universidad Humboldt, en Berlín (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

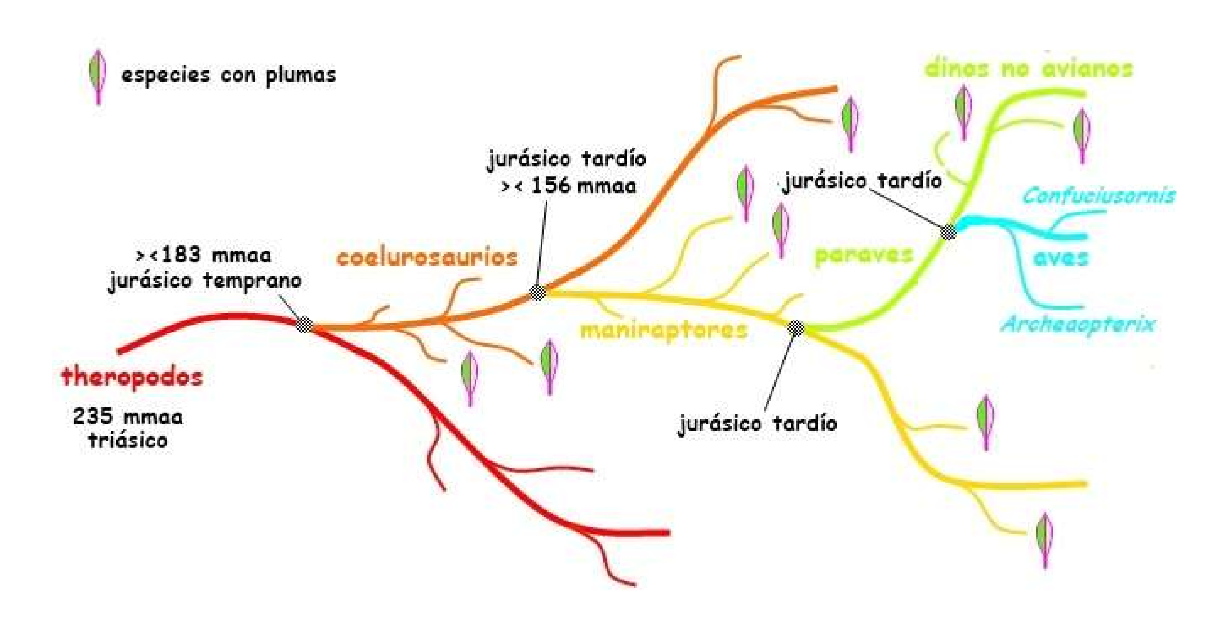
El primer fósil se encontró en 1861 cerca de Langenaltheim, en Alemania. La clara evidencia de plumas en sus articulaciones supuso un revuelo en el mundo del conocimiento evolutivo, ya que parecía haberse encontrado el eslabón perdido entre el dinosaurio y las aves. Eran los momentos del inicio de la batalla darwiniana. Después de este primer fósil se han encontrado diez más, todos ellos en Alemania, el último en 2011.

La existencia de estos fósiles nos alimenta la curiosidad, de forma que vamos a intentar enhebrar un cierto hilo de acontecimientos: desde los dinosaurios a las aves.

Ya sabemos por capítulos anteriores que el árbol filogenético de estos últimos animales se enraíza en los dinosaurios terópodos. En su clado Tetanurae, los "*colas rígidas*", de hace unos 195 millones de años, encontramos al primer ancestro común conocido de todas las aves. Si seguimos por el árbol filogenético llegaremos tras unas pocas derivaciones, más o menos hace unos 175 millones de años,

al clado de los Coelurosauria, los "*reptiles de cola hueca*". En este clado vamos a encontrar los ejemplares conocidos de dinosaurios emplumados. Especímenes que vivieron desde hace unos 163 millones de años, cuando aparece el ancestral *Pedoppena,* "*pie de pluma*", hasta los "cercanos" 65 millones de años, momento en que desaparecieron todos ellos, dejando paso libre a sus hijas las aves.

Dentro del clado coelurosaurio continuó la cadena evolutiva. Hace unos 155 millones de años se desgajan los *Maniraptora* y poco después los *Paraves*. Estos engloban a los *dinosaurios no avianos*, aquellos que representan la última forma de transición entre dinosaurios clásicos y aves, y a las *aves verdaderas*. Entre estas últimas se encuentra nuestro amigo *Archaeopteryx,* del que presumimos una antigüedad de 150 millones de años.



Evolución de los dinosaurios hacia las aves

Destacamos aquí lo que parece ser el santuario mundial de los fósiles de las aves primitivas. Se trata del yacimiento chino de Yixian en el que a principios de los años 90's del siglo pasado comenzaron a estudiarse multitud de ejemplares de los estadios iniciales de la clase aves, entre los que destaca *Confuciusornis sanctus*, la "*ave santa de*

Confucio", que vivió a lo largo de unos 15 millones de años en el Cretácico inferior, hace ahora unos 120 millones de años.



Fosil de Confuciusornis sanctus del Museo de Ciencia de Hong Kong (Wikimedia, CC SY-BA 3.0)

A pesar de que hay una manifiesta mayoría que apoya la teoría de la procedencia dinosáurica de las aves, para algunos las evidencias basadas en los fósiles conocidos no son suficientes como para calmar el debate que explique cómo se pasó de unos a otros. Incluso hay algún científico que aboga por la existencia de dinosaurios consecuencia de una evolución "regresiva" a partir de un ave. No obstante, cada nuevo descubrimiento afianza más la idea original, aunque los estudios genealógicos de detalle siguen adelante y aún son objeto de análisis.

La realidad es que en unos 50 millones de años de cambios, la evolución modeló de forma muy rápida el tamaño y forma de algunos dinosaurios: desde los 165 kilos de los Tetanurae a los escasos mil gramos del *Archaeopteryx*. Una hipótesis [1] que explicaría estas remodelaciones se apoya en la oportunidad que

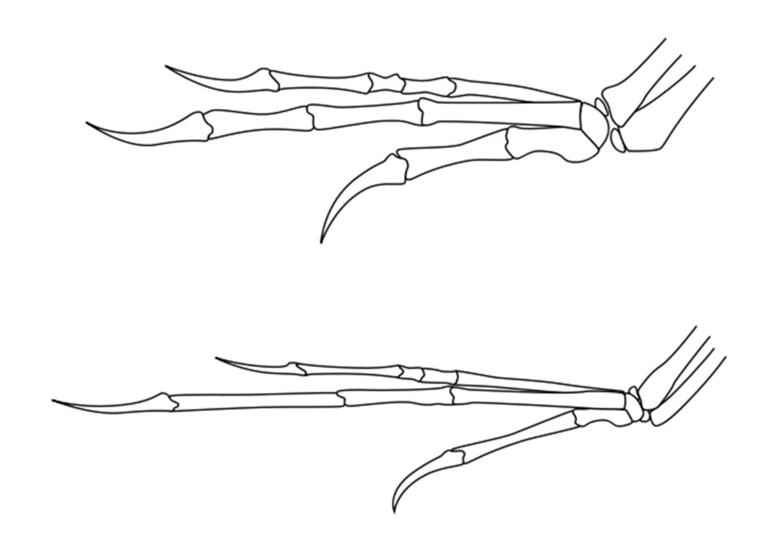
supuso para algunos dinosaurios el conquistar la libertad, protección y nuevos recursos alimenticios que ofrecían las alturas de los árboles.

El proceso habría exigido entre otros, tal como realmente se observa en la realidad, una disminución corporal. A la par que cerebros proporcionalmente mayores con los que gestionar el movimiento en el más complicado medio de la foresta, lo que impulsaría cráneos más grandes mediante ontogenias pedomórficas -como explicamos más abajo- y con hocicos más cortos. La necesidad de perfeccionar la visión tridimensional para moverse con eficacia en el nuevo medio habría llevado al crecimiento de los ojos. Se debió potenciar la función aislante de las plumas para permitir la actividad nocturna y el alargamiento de las extremidades para favorecer los saltos entre árboles. Precisamente el fenotipo que observamos en las aves que nos rodean.

Y no nos olvidemos de algunas características morfológicas que se observan en los fósiles. Los *Neotheropoda,* muy cercanos a las aves aunque eran aún animales carnívoros, ya presentaban la bipedestación y en sus patas tenían solamente tres dedos como las aves modernas. En las manos habían perdido el quinto dedo, mientras que el cuarto quedaba muy reducido.

Poco a poco las semejanzas en las estructuras del esqueleto se fueron aproximando. Cráneo apuntado, cadera de nuevo con el pubis hacia detrás, patas largas y delgadas, fusión de las clavículas para formar la fúrcula así como la transformación anatómica de las extremidades superiores hacia la función "vuelo". Evidentemente, y como prueba de cargo esencial, la existencia de plumas, que fueron evolucionando con el paso del tiempo desde formas pilosas hasta las que conocemos hoy en día. Por no olvidar la evolución de los comportamientos como la ingestión de piedras para facilitar la molienda de los alimentos antes de la digestión, la nidificación y el comportamiento en el cuidado de las crías, o la sociabilidad.

Demos un salto hasta los dinosaurios maniraptores, "*con manos de ladrón*", del grupo de los terópodos. Tenían unos brazos y manos alargadas, las clavículas unidas en forma parecida a la espoleta de las aves, una cola larga y rígida, plumas y una cadera de ave con el pubis hacia atrás. Se supone que los especímenes más primitivos pasaban la mayor parte de su tiempo en los árboles, aunque la casuística de la morfología de estos animales es muy extensa.



Extremidades características de la familia maniraptora (Wikimedia, GFDL 1.2)

Como un ejemplo, el "*pequeño rapaz*" *Microraptor,* que fue un dinosaurio de cuatro alas, del tamaño de una paloma, que vivió hace unos 130 millones de años. El plumaje fosilizado del dinosaurio, de matices azul y negro, es el registro más antiguo del color de las plumas iridiscentes. Al igual que muchas aves modernas, las utilizaba, probablemente, para enviar señales visuales de tipo social. Se han hecho estudios también sobre la cola de este dinosaurio, describiéndola como una superficie más estrecha de lo que se pensaba, con dos plumas alargadas. Los científicos creen que la pluma de la cola era ornamental y que, probablemente, evolucionó para el cortejo y otras interacciones sociales y no para la aerodinámica.



Representación artística del Microraptor
mmartinyuk (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Los microraptores eran muy pequeños, de un kilo de peso. En el otro extremo de los dinosaurios emplumados tenemos a *Yutyrannus huali*, coetáneo del microraptor, que alcanzaba casi la tonelada y media de peso.

Con el tiempo habían desarrollado cambios anatómicos que les permitieron saltar al medio aéreo, lo cual se debió producir antes de la aparición de las aves verdaderas, ya que algunos especímenes disponían de alas bien desarrolladas e incluso protoalas en las piernas que las utilizarían para el planeo.

Un estudio [2] de la Unidad de Paleontología de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) incide en la evidencia de la relación dinosaurio-ave, ya que demuestra que la evolución del cráneo de las aves modernas presenta una correspondencia con el fenotipo de los cráneos de los dinosaurios jóvenes, hecho producido al irse retrasando el camino de maduración joven/adulto en las aves con relación al que seguían los dinosaurios carnívoros terópodos. A este fenómeno, muy habitual en el mundo animal, se le conoce como pedomorfismo, es decir, "*con forma infantil*". Con eso, poco a poco las aves llegaron a retener cuando eran adultas las características de un dinosaurio joven: cuerpo más pequeño, un acortamiento de la

cara en donde se apuntaba poco a poco el pico y unos cráneos proporcionalmente más grandes en donde albergar un cerebro preparado para gestionar las múltiples decisiones que comporta un vuelo.

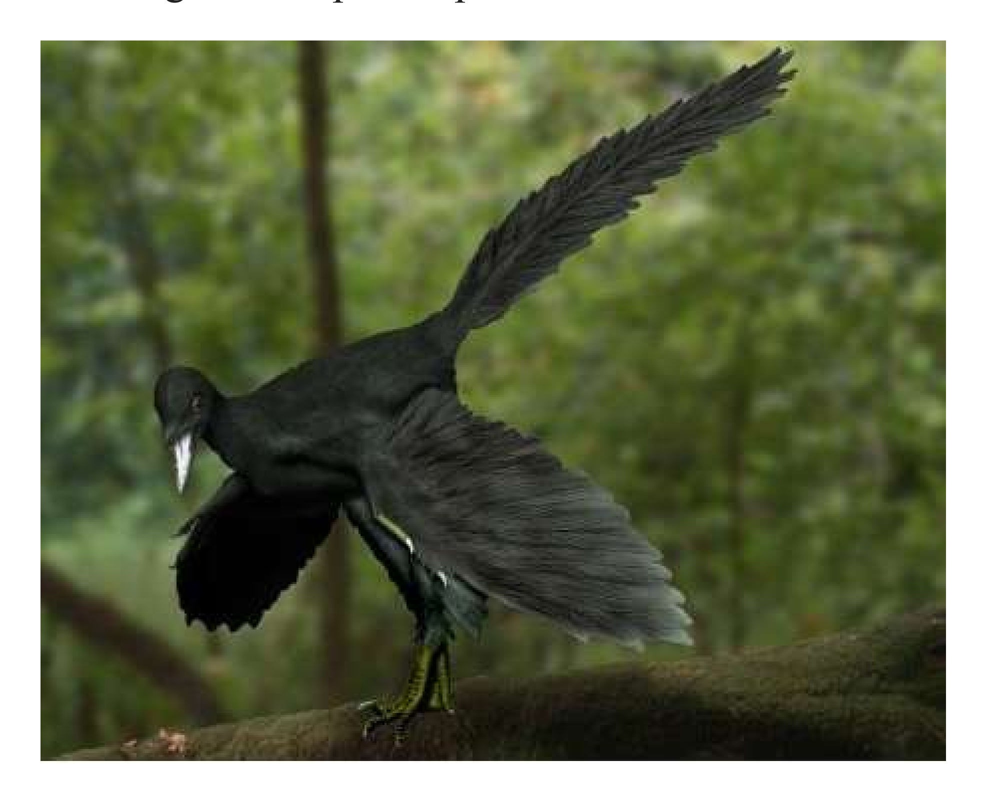


A la izquierda cráneo de un Archaeopteryx juvenil, muy semejante a la de un ave adulta actual. A la derecha el cráneo de Archaeopteryx adulto (Imagen de UAM y universidades de Harvard, Texas y New York, ver nota 2 a pie de capítulo, CC 2.5)

Con ello llegamos al "*ala antigua*", *Archaeopteryx,* que apareció hace unos 150 millones de años. Fue una criatura con un tamaño similar al de un cuervo moderno, unos 35 centímetros, de cabeza pequeña y ojos grandes. Las extremidades eran largas y delgadas, con tres dedos en forma de garra en cada una de las manos alargadas y con los pies típicos de las aves. Los huesos de la parte inferior de las patas eran largos e indican que se trataba de un animal corredor. Con dientes puntiagudos en las mandíbulas y una cola ósea larga, características estas últimas que le asemejan a un dinosaurio terópodo.

Pero tenía también dos peculiaridades que son exclusivas de las aves: una espoleta bien desarrollada, formada por la unión de las dos clavículas, y las plumas que caracterizan a las aves en las extremidades anteriores y sobre la cola, aunque su esternón, hueso donde se anclan los músculos motores del vuelo, era diminuto a diferencia del de las aves modernas. El hecho de que, casi con toda seguridad, esta ave antigua tenía sangre caliente como sus familiares

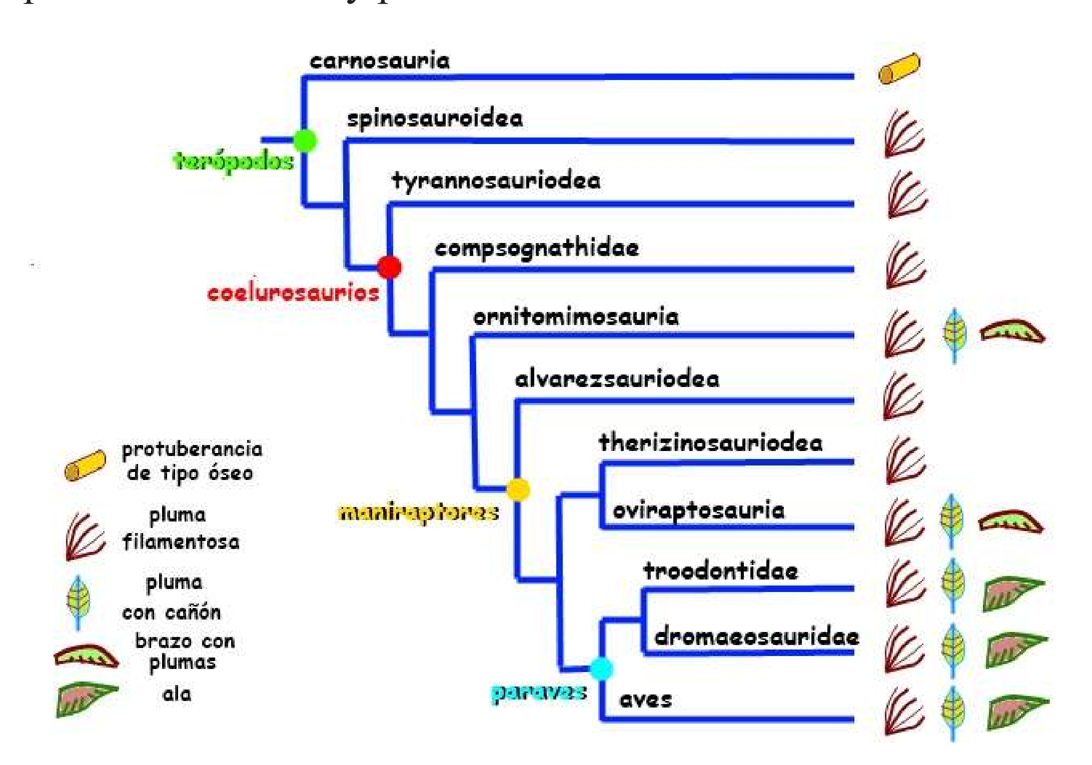
modernos, apuntaría hacia un metabolismo activo que generaba suficiente energía como para soportar el vuelo.



Representación artística de Archaeopteryx (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

No se sabe con certeza si sólo realizaban un planeo o si podían batir las alas con fuerza y volar. En general estas son las dos alternativas en disputa para explicar el origen del vuelo en los animales de su época. Se supone que para volar batiendo las alas se necesita una fuerte estructura muscular pectoral y una quilla donde se afiancen los músculos. Ya sabemos que no disponían de esta estructura ósea, por lo que es probable que no hicieran vuelos largos ayudados por la fuerza de sus alas. Una segunda posibilidad es que su estrategia de caza fuera el otear desde lo alto de los árboles y, una vez observada la presa, sorprenderla desde arriba mediante un planeo. Pero los bosques donde habitaba este animal eran ralos y de árboles no más altos de tres metros, por lo que esta segunda posibilidad también tiene un soporte débil. Una alternativa más plausible sería el que acechara a sus presas desde el suelo, arropado por los

arbustos, y se apoyara en el batir de sus alas para agilizar el último salto, que así produciría un movimiento más versátil y más exitoso a los propósitos de la caza. En resumen, un camino de lenta evolución a través de distintas conquistas: correr, saltar, controlar el desplazamiento aéreo y por fin volar.



Evolución de las plumas en los dinosaurios del jurásico/cretácico

Ya sabemos que los *Archaeopteryx* no fueron los primeros animales con plumas, ya que estas “adornaban” a algunos terópodos mucho antes de que se hubiera inventado la capacidad de volar. Incluso parece ser, según un informe publicado en la revista Science en 2014,[3] que en especímenes de dinosaurios del Jurásico medio del orde ornitisquia, prima lejana de la terópoda, ya se habían desarrollado estructuras semejantes a las plumas. Lo que para algunos sugiere la existencia de estos adminículos ya en el Triásico, hace unos 220 millones de años.

Entonces, si no se crearon para volar, ¿cuál fue el estímulo medioambiental que permitió el desarrollo de las plumas? Bien pudiera haber sido para desarrollar una función de aislamiento

térmico en algún momento del camino hacia la sangre caliente. Sin embargo hay sus dudas sobre esta explicación, ya que se han encontrado fósiles de aves del Cretácico más actuales que los *Archaeopteryx* que parece ser no habían desarrollado todavía un metabolismo de sangre caliente.

Una tercera explicación se ancla en el hecho de que el proceso biológico por el que se generan las plumas no es nada especial. Es un diseño muy antiguo, posiblemente más antiguo que el que dio a luz a las protecciones de los placodermos o a los "dientes" de los conodontos. ¿Recordáis lo que ocurría en aquel antiguo periodo Silúrico? En el capítulo 29 decíamos: "*Posteriormente a la aparición de la mandíbula aparecieron los dientes como excreciones óseas de la piel que la recubría, formados a partir de una invaginación en las dos capas del tejido cutáneo, derivando una de ellas en una estructura interna con dentina y otra en una externa de esmalte*".

Este tipo de mecanismo es común en la generación de dientes, pelos, escamas, plumas, glándulas sudoríparas e incluso de las glándulas mamarias. El inicio se produce cuando en un determinado momento, dirigido por proteínas y genes específicos, en dos capas de tejido epitelial que se encuentran físicamente próximas una a otra se inicia un proceso por el que las células se dividen y crecen, haciendo que las capas vayan cambiando de forma. Se produce un plegado que se invagina y se generan un tipo particular de proteínas que favorecen el proceso y determinan el resultado final. Es evidente que este proceso común es la prueba de que órganos tan diferentes como los dientes, plumas y mamas están intrínsecamente unidos por la historia biológica. Es decir, una pluma sería simplemente una variación de una solución evolutiva ancestral.

Si buscáramos en un ancestro común de la familia *Archosauria*, de donde provienen los dinosaurios, sus hijas las aves y los cocodrilos, posiblemente hallaríamos ya pistas de las plumas. Quizás no evidencias visibles de animales emplumados, sino proteínas y

desarrollos embrionarios dirigidos por genes que se repiten curiosamente en cocodrilos y aves. Y así es.

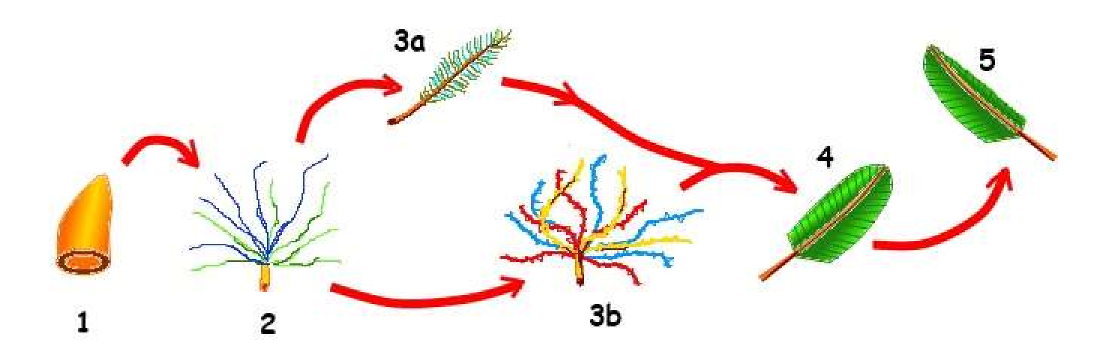
Cocodrilos y dinosaurios se separaron hace 230 millones de años. Y a pesar de ello los cocodrilos aún conservan la impronta de las plumas, como se ve en sus embriones que desarrollan el mismo tejido que en las aves deriva en plumas. También tienen la proteína "queratina de las plumas" con la que fabrican sus escamas, curiosamente semejantes a las escamas que las aves actuales tienen en sus patas.

En los embriones de las aves se genera un tejido "escamoso" que se diversifica, por un lado, formando las escamas de las patas, y por otro, formando las plumas. En este caso las escamas embrionarias derivan a filamentos tubulares o barbas, *que son como pelos* huecos pero que pueden tener derivaciones en toda su longitud, formando desde plumones hasta las plumas de vuelo o de cortejo.

Y este último detalle, las plumas de cortejo, es el que lleva a pensar que el desarrollo de las plumas fue, una vez más, un argumento de selección sexual. En base a que el emparejamiento es más esencial para la vida y transmisión de los propios genes que la estrategia metabólica de sangre caliente o la habilidad de volar, bien pudiera ser que las plumas, unos apéndices que exigen recursos ¿innecesarios? importantes, fueran el primer paso de un desarrollo y transformación de las escamas reptilianas, favorecido por la realimentación de tipo sexual y reproductora que producirían, al estimular a las hembras con su colorido, variación y reflejo de la luz solar.[4] Precisamente en base a estas características estéticas, con posterioridad derivarían a otras funciones. La primera, la de aislamiento térmico, al haber creado un colchón de aire entre el cuerpo y el exterior, efecto reforzado por una capa iridiscente que reflejaba la luz solar. El último paso, sorprendentemente, sería la habilidad que se conquistaría en base a su liviandad y su capacidad de crear superficies de sustentabilidad en el aire: el vuelo.

Con relación a la selección sexual algún científico opina haber encontrado evidencias de ello.[5] Datados a finales del Cretácico, los fósiles de *Ornithomimus* descubiertos en Colorado, Estados Unidos, en 1890, permiten observar que las plumas en los brazos se encuentran sólo en los adultos y no en los individuos jóvenes. Lo que daría pie a que estos aditamentos sólo tuvieran propósito en la fase adulta como elemento de atracción macho/hembra más allá de sus posibilidades para el desplazamiento.

Las mismas plumas presentan una historia de desarrollo evolutivo propia, desde lo que se considera la primera a las actuales, según el esquema siguiente de incremento de complejidad:



Pasos en la evolución de las plumas

La primera pluma sería un cilindro hueco, como un pelo grueso (**1**). Con el tiempo estos pelos ya más desarrollados se unirían a la caña de la pluma en forma de abanico (**2**). De esta disposición palmeada, y al aparecer una modificación de las barbas, se pasó a la forma palmeada **3b** o bien a una disposición parecida a las plumas actuales con filamentos a uno y otro lado de la caña (**3a**), pero sin estar aún unidas por pequeños garfios. El siguiente paso evolutivo llevó precisamente a unir las barbas laterales mediante esta disposición tipo velcro, con lo que se ganó en rigidez (**4**). Finalmente aparecen plumas **asimétricas** (**5**), a partir de las cuales se piensa que pudo surgir finalmente el vuelo ya que su especial estructura es la que permite soportar los esfuerzos dinámicos que el vuelo produce en ellas. El *Archaeopteryx* ya presentaba plumas de este tipo.

Con esto dejamos este amplio recorrido de la conquista de los cielos por unos animales llenos de claroscuros, aunque muy especiales, como fueron los dinosaurios. El capítulo que continúa sí va a estar dedicado exclusivamente al periodo que sigue al Jurásico: el Cretácico. A pesar de que el que ahora acabamos se ha tomado la prerrogativa de adentrarse en este último periodo de la era Mesozoica antes del tiempo marcado por el ritmo de este relato. Hablaremos de su geología, climatología y atmósfera, así como de lo que le aconteció en aquellos años a la biota vegetal.

NOTAS DEL CAPÍTULO 42:

1. "*Sustained miniaturization and anatomical innovation in the dinosaurian ancestors of birds*", Michael S. Y. Lee et al. Publicada en la revista Science de agosto de 2014.

2. "*Birds have paedomorphic dinosaur skulls"*, Bhart-Anjan S. Bhullar et al. Publicado en la revista Nature en mayo de 2012.

3. "*A Jurassic ornithischian dinosaur from Siberia with both feathers and scales*", Pascal Godefroit et al., informe publicado en la revista Science de Julio de 2014.

4. NdE: Un amigo gustaba de decir, en un rasgo de humor y por aproximación a las leyes de la robótica de Asimov, que además de las tres leyes de Mendel, había una *ley cero*: "Si tus padres no tuvieron hijos, tú no tendrás hijos".

5. "*'Bird mimic' dinosaur hints that wings evolved for show not flight*". Podéis encontrar más información al respecto en la web de National Geographic, octubre de 2012.

43. El Cretácico y sus plantas

En el capítulo que precede escribíamos acerca de la fantástica conquista del vuelo por parte de los ubicuos y evolucionados dinosaurios. Esa habilidad se había aprendido a partir de que alguna célula epitelial de un antiguo arcosaurio evolucionara a través de un proceso por el que una escama de reptil devenía una especie de pelo, que se fue complicando hasta llegar a ser una pluma. Aquello sucedió, creemos, a lo largo del periodo Jurásico tardío. En la frontera con el Cretácico ya volaban las aves propiamente dichas, y hasta su final, hace 65 millones de años, estos animales siguieron siendo muy abundantes.

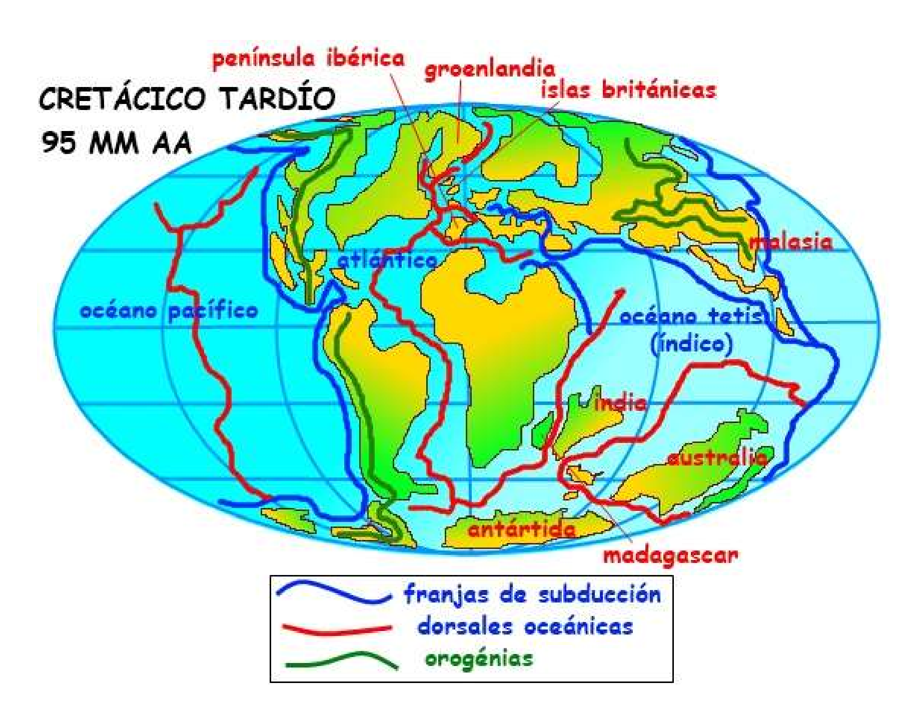
En este nuevo periodo, el Cretácico, que empezó su recorrido hace 145 millones de años, aparecieron las plantas angiospermas y las flores. En tierra siguiron dominando los dinosaurios, mientras que a los mamíferos no les había llegado aún su hora, si bien ya correteaban las familias -taxonómicamente órdenes- a las que estamos acostumbrados hoy en día: monotremas, marsupiales y placentarios.



En 1822 el geólogo belga D'Omalius d'Halloy llamó "*Terreno Cretáceo*" a los afloramientos calizos de la Cuenca de París, que

tienen una antigüedad de unos 100 millones de años. La palabra creta viene del latín y corresponde a un tipo de roca caliza porosa formada por conchas calcáreas de cocolitos y foraminíferos. De aquí que aquel periodo pasó a llamarse *Cretáceo*, es decir "portador de creta".

A lo largo de aquella etapa la ruptura de Pangea ya era completa, de tal forma que a finales del periodo la disposición continental se asemejaba mucho a la actual.



Aparecen las plantas angiospermas y las flores. En tierra siguen dominando los dinosaurios, mientras que a los mamíferos no les había llegado aún su hora, si bien ya correteaban las familias -taxonómicamente órdenes- a las que estamos acostumbrados hoy en día: monotremas, marsupiales y placentarios.

Sabemos que durante el Jurásico los mares fueron subiendo de nivel gracias a las grandes aportaciones de materiales plutónicos que surgían por las dorsales oceánicas. Las aguas más altas fueron rellenando los huecos que los rifts iban dejando en el desmembramiento de Pangea. Esta tendencia continuó a lo largo de la primera mitad del Cretácico, de forma que el nivel del mar llegó a las mayores cotas nunca alcanzadas, dejando muy poco territorio

fuera del agua. En su punto máximo solamente el 18% del planeta lo constituían las tierras secas. Podemos compararlo con el dato de hoy en día, que es del 28%. Es decir, actualmente hay aproximadamente un 50% más de tierras emergidas que en los "peores" momentos del Cretácico.

Contemplemos ahora el mapa de más arriba en el que están dibujadas, como líneas de color rojo, las dorsales marinas que iban motorizando el movimiento de los continentes. Como podemos ver siguiendo su trazado, la actividad geológica debió ser impresionante. Al inicio del periodo, 130 millones de años, prácticamente había dos continentes principales, Laurasia y Gondwana, separados por el mar de Tetis y el Atlántico norte.

Con el paso de los millones de años Gondwana se fue abriendo como un abanico, con el clavillo en posición de polo sur. Al oeste la varilla de Sudamérica que quedaba aislada de Norteamérica. En el centro África, de la que se habían desgajado por el sudeste la Antártica y Australia, todavía unidas. En la grieta intermedia "flotaban" solitarias la India y Madagascar.

Por su parte, Laurasia quedó desmembrada en múltiples territorios, el mayor de los cuales lo constituía la zona "asiática" de Eurasia, a la que ya se le habían unido por el sur los bloques del continente Cimmeria y China.

Una importante masa de agua se extendía desde las aguas del Polo Norte hasta la península de Yucatán y México. Otra vía marina cruzaba África a través de la región del Sáhara central. El mar de Tetis, que anteriormente limitaba con el sur de Europa, creció hasta cubrir las islas británicas, Europa central, el sur de Escandinavia y la Rusia europea.

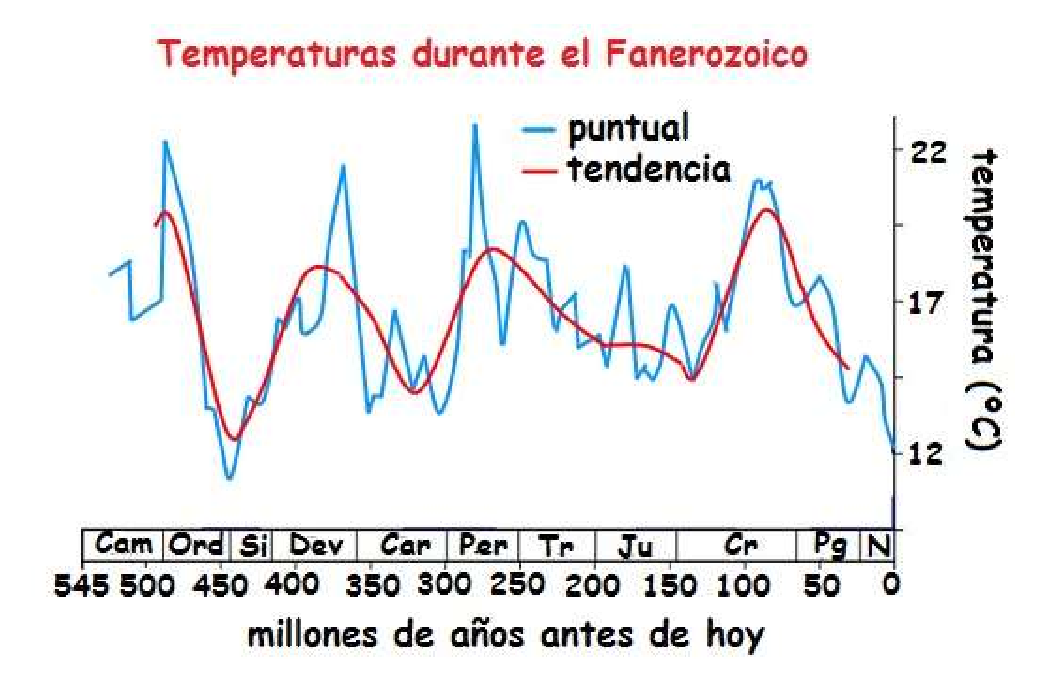
Mientras las aguas traspasaban de norte a sur las tierras, en las costas oeste sobre el Pacífico -llamémosle ya así- continuaba la formación de las orogenias circumpacíficas americanas.

En resumen, la tierra estaba fragmentada en más de doce masas importantes, con canales de agua, amplias plataformas y mares someros por todos los lados, en los que proliferó la vida elemental planctónica y donde se establecieron potentes arrecifes.

Una segunda e importantísima consecuencia de la gran desmembración territorial fue el aislamiento de la fauna. Es de sobra conocido que, para una población, el hecho de permanecer en un ambiente concreto sin intercambios genéticos con otros grupos, en donde las únicas influencias son las del medio particular en donde se encuentra, es un factor evolutivo hacia nuevas formas. A este tipo de *especiación* por aislamiento geográfico se le conoce como *alopátrica*. Y esto era lo que sucedía a mediados del Cretácico cuando Sudamérica era una superisla, como también lo eran África, Antártica/Australia, Madagascar, Norteamérica o Eurasia. No es de extrañar que en cada una de ellas apareciera una fauna distinta, como comentaremos en capítulos posteriores.

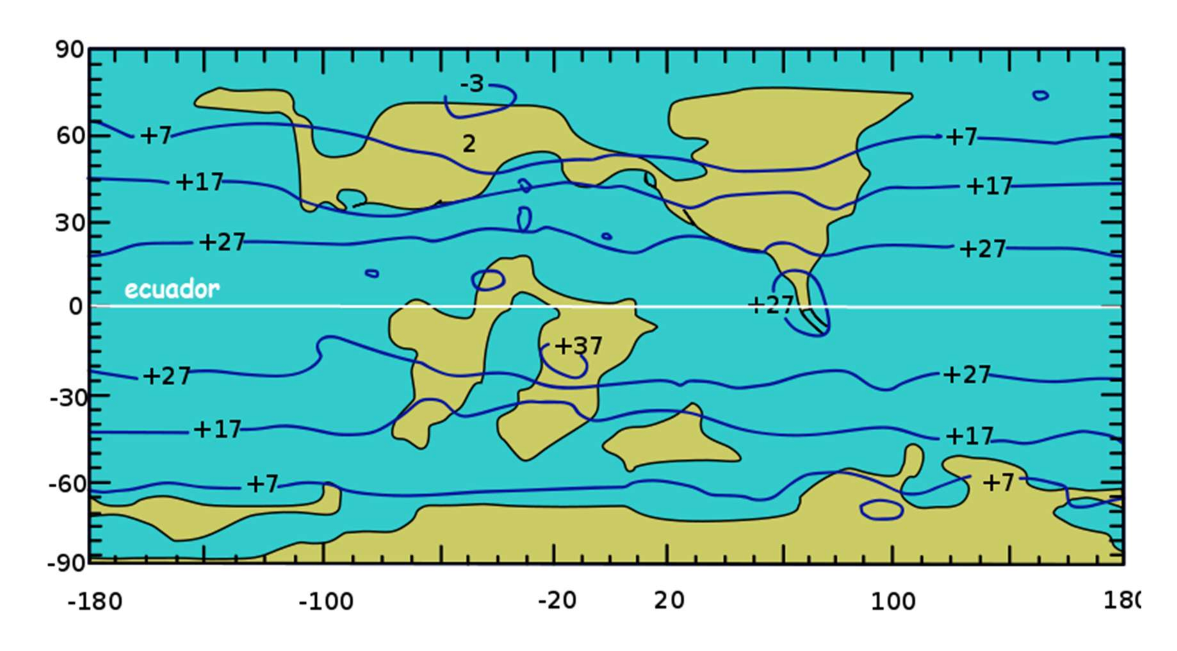
La geografía condiciona la fauna y también al clima. Se rompieron las grandes distancias en el continente de Pangea, se fraccionaron las costas, incrementándose las zonas con influencia del mar, y subió el nivel de las aguas, con lo que se acrecentó la superficie de mares someros y de aguas cálidas. Como consecuencia, se fue asentando un clima más oceánico. El crecimiento de los mares llevó emparejada la disminución de la superficie de tierras y por tanto del albedo terrestre: se reflejaba menos radiación solar y la Tierra, por consiguiente, se calentó. A ello se le unieron las importantes emisiones de CO_2 debidas al incremento del vulcanismo por el intenso proceso de fracturas geológicas, lo que acrecentó aún más el efecto invernadero. Como consecuencia se inicia un cambio de ciclo en el que se le tuerce la tendencia al descenso progresivo de la temperatura media de los últimos periodos. Desaparece por tanto el ligero interludio glaciar, iniciándose una tremenda escalada de la temperatura media en el planeta. Los sedimentos muestran que las temperaturas en la superficie del océano tropical debieron haber sido entre 9 y 12°C más cálidas que en la actualidad, mientras que en las

profundidades oceánicas las temperaturas debieron ser incluso de 15 a 20°C mayores. Eso era debido a la intensa evaporación en los mares tropicales, lo que salinizaba sus aguas haciéndolas más densas, por lo que se hundían estando aún calientes. En una visión macro del periodo, más calor y más humedad en general.



Más calor y más humedad, con una distribución geográfica continental y marina más fragmentada, con canales norte/sur que comunicaban todas las masas de agua. Era una situación que favorecía el transporte de calor por las corrientes marinas desde los trópicos a los polos, por lo que las temperaturas globales se hacían más uniformes a la vez que se favorecería también el transporte de humedad atmosférica desde el ecuador a latitudes altas, en donde las lluvias serían más abundantes.

Sin salirse del contexto general de altas temperaturas, a finales del Cretácico se invierte la tendencia. Era el aviso de que la Tierra empezaba a deslizarse hacia una época llena de episodios glaciares en la que aún vivimos, lo que iba a provocar una progresiva regresión de los mares que tuvo como consecuencia un marcado descenso del nivel de sus aguas.



Isotermas en el mapamundi cretácico, en ºC (Wikimedia, dominio público)

Las plantas

Las altas temperaturas, la mayor pluviometría y los elevados niveles de CO_2 favorecieron el desarrollo de las masas vegetales. Por otro lado, el mayor equilibrio térmico entre las diversas latitudes del planeta provocó el que hace unos cien millones de años los bosques se extendieran casi hasta zonas polares. El estudio de los anillos de los árboles fósiles muestra que en aquellos momentos su crecimiento era el doble que en la actualidad.

Este crecimiento fue especialmente grande cerca de los polos, de forma que se han encontrado árboles de la Antártida con un espesor medio de sus anillos superior a los dos milímetros. Los bosques se extendieron como un continuo entre los polos.

Recordemos el gran avance cuando aparecieron las gimnospermas con sus semillas allá por el Carbonífero. En este periodo Cretácico siguen presentes, estando representadas principalmente por las coníferas, ya que ginkgos y cícadas experimentaban entonces un franco retroceso.

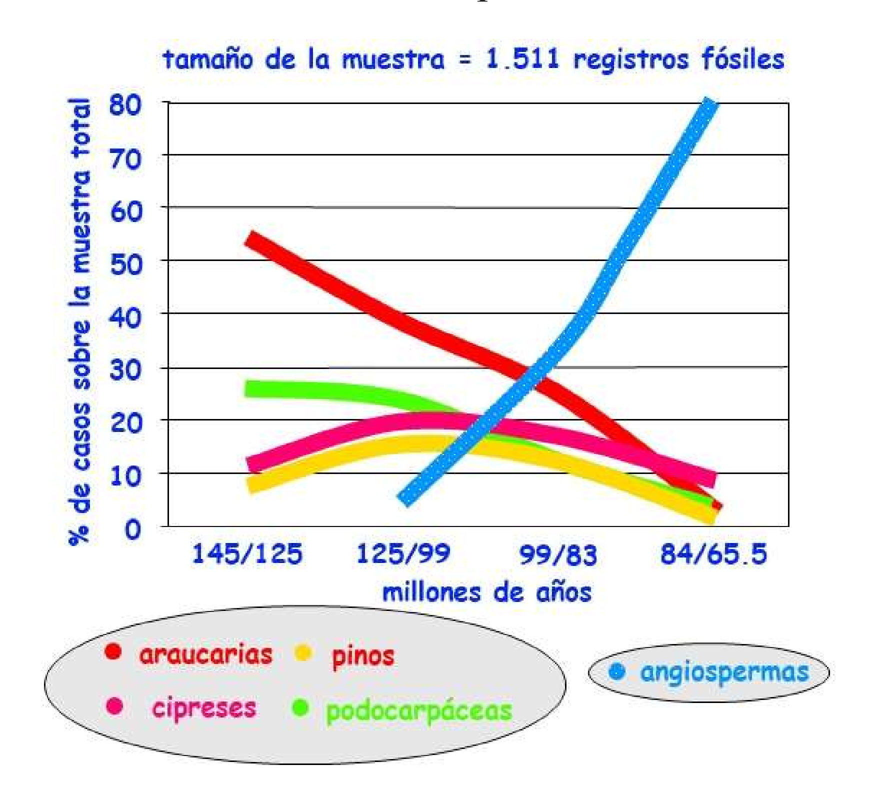
Sin embargo, el aspecto más importante de la biota vegetal, y que caracteriza a este periodo, es la aparición y pujanza de las plantas angiospermas y con ellas las ***primeras flores*** y frutos. Etimológicamente su nombre proviene del griego αγγειον, *ánfora* y σπέρμα, *semilla*, apuntando a su característica de plantas con flor y semillas encerradas y protegidas.



Ilustración basada en los diversos restos fósiles encontrados -más de mil- de Monteschia vidalii, en la que se aprecia la planta y sus flores que desarrollaban una única semilla. Como se explica en el texto, esta planta soporta la evidencia más antigua de flores. (Crédito: Oscar Sanisidro, fair use)

Su aparición se produjo en algún momento del Cretácico inferior, siendo el fósil más antiguo conocido el de *Montsechia vidalii* -ver la imagen anterior- encontrada en varios yacimientos situados en España y cuya antigüedad se estima entre 130 y 125 millones de años.[1] Lo más curioso de esta planta acuática, que mantenía sus tallos y hojas completamente sumergidos, fueron sus flores que no tenían ni pétalos ni sépalos y que además se polinizaban gracias al arrastre que las aguas ejercían sobre su polen. En China se ha encontrado otra planta semejante, *Archaefructus sinensis*, de

antigüedad parecida, aunque en este caso la polinización se llevaba a cabo a través del aire. Ambas especies permiten pensar que este tipo de plantas acuáticas, abundantes durante el inicio del Cretácico, pudieron ocupar una posición basal en la línea evolutiva del linaje de las angiospermas, tras las que se inició una progresiva difusión y diversificación que las ha conducido hasta sus actuales 250.000 especies, en contraste con las 550 especies de coníferas existentes.

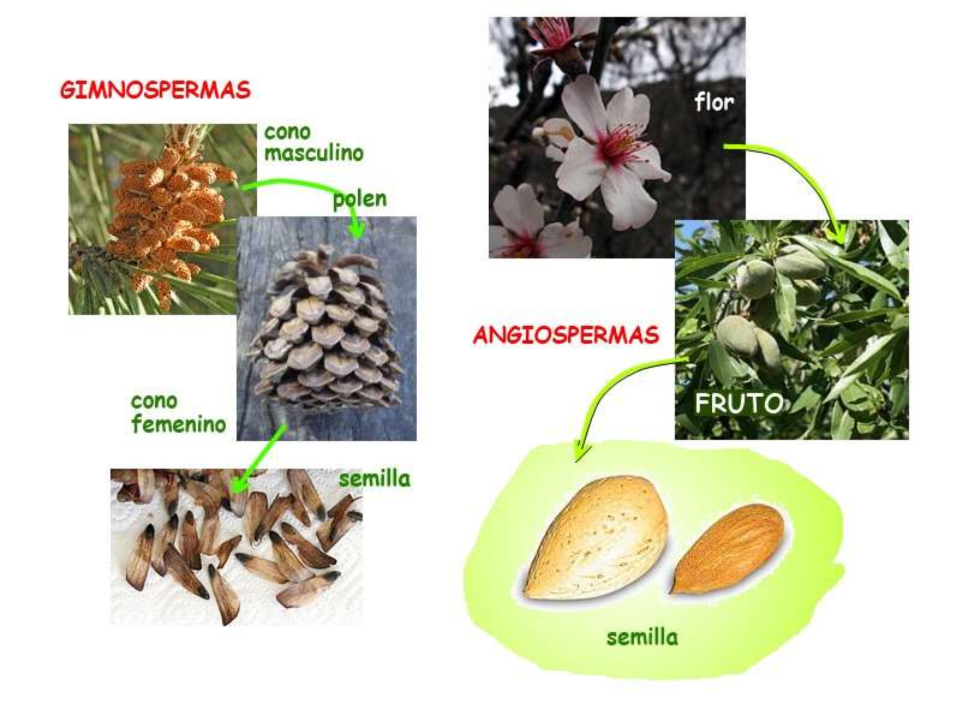


Evolución de la intensidad de ocurrencia según tipos de plantas durante el Cretácico (según el estudio mencionado de Emiliano Peralta-Medina y Howard J. Falcon-Lang, ver nota 2 a pie de capítulo, fair use)

Un estudio [2] realizado en 2012 en la Royal Holloway University de Londres llega a la conclusión de que al final del periodo representaban el 78% del total de todas las plantas. En este estudio se ha analizado una muestra de 2.238 fósiles de plantas datados en el periodo Cretácico. De todos ellos, 1.511 correspondían a especies que aún perviven en la actualidad. Se posicionó a este último grupo según parámetros geográficos y cronológicos, lo que ha permitido

determinar la posible evolución de las diversas especies a lo largo del tiempo. Las curvas de la figura siguiente son bastantes expresivas de lo que sucedió: un cambio radical desde una predominancia de las plantas gimnospermas (coníferas) a un dominio de las nuevas angiospermas.

Ante este éxito nos surge la pregunta sobre el porqué del mismo y el porqué del momento. Es evidente que su expansión no restó valor a la eficacia de la solución gimnosperma, que siguió prosperando como un recurso evolutivo viable. Tendremos que buscar el mayor éxito de las angiospermas, su diversidad y ubicuidad, en alguna de las diferencias con respecto a la antigua solución. Fisiológicamente las estrategias no varían entre ambas divisiones de plantas. El gran salto adelante se concretó en una diferente herramienta para la reproducción: **la flor**. Y lo que le acaeció a la flor con el paso del tiempo.



Diferente protección de la semilla en gimnospermas y angiospermas (Imágenes a partir de wikimedia, GFDL 1.2, dominio público y CC BY-SA 2.1 Spain)

En un principio reunió en un mismo instrumento los gametofitos masculinos y femeninos, lo que simplificaría la fecundación. En segundo lugar, el desarrollo de la semilla quedó más protegido en el interior del ovario y demás órganos florales, en contraste con el interior del cono femenino de las gimnospermas compuesto por escamas independientes y fácilmente accesibles. En tercer lugar, el desarrollo de la semilla se protegió con un grueso tejido que devendrá una fruta. A lo que se les añadieron las ventajas "operativas" resultantes de refinamientos en el proceso de polinización y de expansión de las semillas.

Vamos a intentar analizar ahora cómo y en qué momento surgieron en el panorama de los vegetales las angiospermas con sus flores.

Hay que reconocer que el tema no está muy claro. Esto debió producirse cuando la evolución de los genes estuviera preparada y cuando el medio ambiente en el más amplio de los sentidos fuera propicio para dejar actuar a esos genes. Se cree que evolucionaron a partir de algún grupo de gimnospermas como pudieron ser las gnetales, que presentan características a mitad de camino entre coníferas y angiospermas, o como pudo ser alguna cicadácea.

Los primeros fósiles de angiospermas datan de hace unos 140-130 millones de años y se tratan de pólenes encontrados en Marruecos e Israel. De unos pocos años después ya se encuentran restos de hojas, que eran pequeñas, con nervadura irregular y bordes lisos y sencillos, por lo que podrían ser de matorrales o arbustos. El hábitat de las plantas más ancestrales de este tipo correspondía a tipos de terrenos muy castigados por las escorrentías e inundaciones. Este tipo de plantas debieron verse favorecidas en estos suelos, puesto que al tener un ritmo de generación de semillas muy elevado, más que el de las coníferas, y además muy pequeñas, la probabilidad de dispersarse y prosperar tenía que ser considerable. En el yacimiento de Yixian en China se ha encontrado el fósil de lo que se

considera la angiosperma más primitiva, el *Archaefructus,* datado hace 125 millones de años.

No obstante estas dataciones, habrá que estar al tanto de los resultados de un estudio realizado sobre pólenes fósiles encontrados en Suiza y en el mar de Barents, al sur de las islas Spitzbergen.[3] En aquel momento estos lugares se situaban en latitudes tropicales. Los investigadores aseguran que estos fósiles presentan características similares a la de pólenes de angiospermas del Cretácico temprano. Estos fósiles ancestrales están datados en hace 245 millones de años, cien más que las evidencias fósiles de Yixian.



Fósil del yacimiento de Xiyian correspondiente a Archaefructus lianoningensis de 125 millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 2.5 Generic)

Las flores tuvieron que evolucionar a partir del software genético que ya gestionaba un órgano como es el cono -la piña- de las gimnospermas. A fin de cuentas, tenía que realizar una función semejante. Se supone que el inicio de estos aditamentos en las plantas fue el resultado de una defensa del material más precioso

para su reproducción. La aparición de nuevas hojas o escamas protegiendo a los gametofitos suponía una ventaja evolutiva frente a la voracidad de los insaciables insectos. Ya en el mencionado fósil de *Archaefructus* de la formación de Yixian se observan unas inflorescencias que presentan sus órganos masculinos y femeninos separados, estos últimos envueltos en algo que parecía una hoja doblada. En la misma formación se han encontrado también fósiles de flores con una estructura semejante al de las actuales angiospermas más basales, como puede ser el aguacate. En ellas las flores están más organizadas, aunque parecen estar formadas por lo más esencial: los pistilos u órganos femeninos, los estambres u órganos masculinos y los tépalos que a fin de cuentas son hojas modificadas que protegen a estambres y pistilos.

Las angiospermas más ancestrales exhiben una gran diversidad en cuanto al número, disposición y estructura de los órganos florales, como si se hubiera producido una múltiple exploración hacia diseños diferentes. Con el paso del tiempo, las nuevas angiospermas complican las protecciones y uniformizan la estructura de sus flores. Según un estudio de la universidad de Florida,[4] es posible que el cambio fuera motivado al modificarse las cadenas de expresión secuencial de genes que ya eran operativas en las gimnospermas, de forma que se fue derivando con el tiempo su inicial influjo sobre los órganos centrales de la flor trasvasándose de una forma progresiva su acción hacia los órganos periféricos, los cuales se iban viendo potenciados.

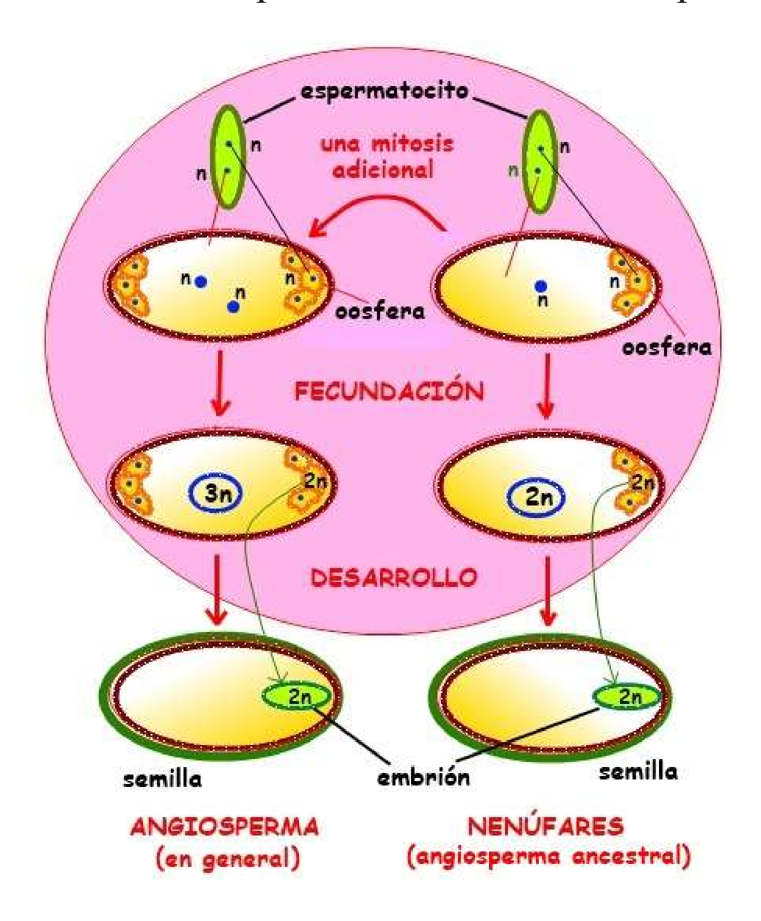
De la flor surgieron los **frutos** y las **semillas**. Los frutos, como elementos de protección de las semillas así como actores principales en la función de su diseminación, como comentaremos más tarde. Las semillas, cumpliendo las mismas funciones de siempre. En los primeros momentos del periodo Cretácico la diversidad en formas de frutos y semillas era escasa. Más bien se trataban de frutos secos y sin unas características especiales que nos permitieran presumir que su dispersión fuera fácil. En aquel momento aún no era muy significativo el cambio climático que más tarde llevó al incremento

de humedad que comentamos en los primeros párrafos de este capítulo. Por ello, las semillas fósiles corresponden a frutos secos, y son de pequeño tamaño. Se observa que aún sin variar en el tiempo este tipo de morfología, a medida que la pluviosidad se intensificaba en el planeta la diversidad de formas se va haciendo mayor, encontrándose en el registro fósil unas semillas más grandes y unos frutos más carnosos. Este tipo de frutos con pericarpios generosos aparecen durante el Cretácico superior casi en la frontera con el Cenozoico (65 millones de años).

No sólo evolucionó con el tiempo la morfología de los frutos de angiosperma, sino también su maquinaria embrionaria. Se sabe que el fruto y semilla que se producen tras la fecundación en una flor de este tipo de plantas es el resultado de un sorprendente *proceso de doble fertilización* consecuencia, como veremos en el siguiente párrafo, de una modificación durante el camino evolutivo de los gametos femeninos. El masculino, que queda contenido en el polen, tiene dos núcleos germinales, mientras que el gameto femenino situado en el gineceo de la flor está formado por siete células. Una de ellas tiene un doble núcleo, mientras que las otras seis, entre las cuales se encuentra la germinal oosfera, solamente tienen uno. Durante el proceso de fecundación uno de los dos núcleos del esperma fertiliza a la oosfera, iniciando así la vida del embrión. El segundo núcleo del esperma fecunda la célula de doble núcleo, formando una nueva con triple juego de cromosomas y que desarrollará el tejido alimenticio de la semilla. Las otras cinco células femeninas formaran los sacos protectores del embrión. La semilla así generada, conjuntamente con el tejido evolucionado del ovario de la flor, conformarán el fruto.

Aunque no siempre fue así. El profesor Ned Friedman de la universidad de Harvard mantiene la teoría de que la complejidad de este proceso ha sido el resultado evolutivo de una duplicación operativa en una angiosperma primitiva.[5] Ha estudiado cómo es el proceso equivalente en nenúfares, plantas que filogenéticamente y cronológicamente se sitúan en la base de las angiospermas (se

conocen fósiles de la familia datados hace unos 120 millones de años). Sorprendentemente, los nenúfares manejan la mitad de la estructura genética que la mayoría de sus familiares: el esperma con dos núcleos germinales y el óvulo formado por cuatro células, todas ellas haploides. Es fácil colegir que la evolución hacia las formas de doble fecundación más modernas surgieron al producirse un error durante este proceso en las formas ancestrales: una mitosis adicional en el proceso de desarrollo del gameto femenino duplicó el escenario. Al observar la morfología de los gametos participantes en ambas modalidades se ve que realmente esto es lo que sucede.



Evolución del proceso de fecundación del embrión en las plantas angiospermas, desde la fecundación simple de las más ancestrales a la fecundación doble de las posteriores.

La evolución hacia la doble fecundación en las modernas angiospermas representó una oportunidad ventajosa en el permanente escenario de la selección natural, y desembocó a la

postre en una nueva clase de plantas basada en una máquina reproductiva súper-eficiente. Pero éste no fue el único éxito de las plantas angiospermas. La evolución les llevó también a dominar nuevas formas de diseminar su simiente.

Una de ellas es la polinización realizada mediante la acción de los insectos. Su gran ventaja es que permite un intercambio genético entre individuos muy lejanos y en poblaciones muy pequeñas. Esta modalidad es la que más éxito ha conseguido, ya que el 90% de las angiospermas actuales disfrutan de polinización realizada por animales, ya sean mamíferos, aves o insectos. La mayoría de los botánicos opinan que la evolución ha primado esta modalidad, ya que ofrece una gran ventaja en contraste con la polinización por efecto del viento: la precisión. Las evidencias permiten asegurar que se produjo un proceso de coevolución con esos animales. Efectivamente, los estudios filogenéticos y paleontológicos indican que hubo una estrecha relación entre polinizadores y plantas de muy diversos tipos y sin parentesco directo entre ellas. Ya sabemos desde el capítulo 33 que los insectos estaban allí desde hacía muchos millones de años. Los primitivos coleópteros, los dípteros, los himenópteros… siguieron prosperando a lo largo del Triásico y Jurásico con un gran esplendor de diversificación justo en el momento en que nos encontramos. Inicialmente serían hematófagos o fitófagos. La presión de una sobreabundancia de población y las estrategias de defensa que adoptaban las plantas frente a los ataques de los insectos hizo que estos "descubrieran" el potencial proteínico de pólenes y semillas. El inicio de la polinización por animales pudo haberse producido en tres linajes basales de plantas sin ninguna conexión entre ellas, incluso ya en gimnospermas. Parece claro el papel relevante de los coleópteros en la diversificación de las primeras plantas con flores –quizás fueron los primeros en polinizarlas-, aunque también los dípteros y otros grupos de insectos debieron participar en la tarea ¿Qué es lo que atrajo a los coleópteros hacia aquellas flores primerizas? Además de que el polen tuviera un gran atractivo proteínico y energético para los pequeños insectos, se

supone que pudiera ser que las flores les ofrecían una especie de cobijo templado gracias al calor residual del metabolismo vegetal.

De esta forma, de lo que en principio fue una amenaza para las plantas, la evolución supo sacar una impagable oportunidad. De tal forma que, con el paso del tiempo, las morfologías polinizador/polinizado coevolucionaron a la par y se hicieron tan dependientes que hoy en día es fácil observar que para un determinado tipo de planta existe un determinado tipo de polinizador en una perfecta relación de mutualismo.

Y no se reduce la historia al caso de los pólenes. El fruto de las angiospermas exige para su producción un gasto energético para algo que en principio podríamos pensar que no le añade ninguna ventaja reproductiva. Pero realmente no es así. Sus formas, colores y valores nutritivos eran un reclamo para cualquier tipo de animal, que encontraban en ellos un agradable almacén de energía en forma de azúcares. Los animales frugívoros, además de comer la carne del fruto ingerían las semillas, que luego eran diseminadas con sus deposiciones. Y así como hubo y hay coevolución entre animales polinizadores y flores, parece que no existe lo mismo entre frugívoros y frutos. No obstante, una vez que se cruzó la frontera Cretácico/Terciario se observa una evolución relativamente rápida de una gran cantidad de tipos y tamaños de frutos, lo que algunos autores achacan al rápido desarrollo de las aves y de los mamíferos, los principales encargados de la dispersión de las semillas y frutos en la actualidad.

A finales del Cretácico el porte de las angiospermas se había hecho mayor, y ya se reconocen algunas de las plantas actuales como hayas, higueras, abedules, acebos, magnolias, robles, palmeras, sicomoros, nogales y sauces, especies que en la actualidad pueblan nichos muy diferentes. Sus bosques no sólo proporcionaron hábitats que más tarde dieron apoyo a la diversificación de anfibios, hormigas, mamíferos placentarios o helechos, sino que también fueron el origen de un beneficio para el *Homo* tecnificado. La

exuberancia de la vegetación de angiospermas durante el Cretácico queda manifiesta hoy en día en los extensos depósitos de carbón que se encuentran en latitudes superiores a los 50º, tanto en el norte como en el sur. Los grandes yacimientos que se explotan en la actualidad a cielo abierto en el oeste de Estados Unidos se formaron en aquellos momentos.

Y hasta aquí el análisis de la evolución de estas maravillosas plantas que ponen a disposición de la humanidad los principales almacenes de alimentos que tenemos: los graneros de cereales, los llamados frutos secos y las huertas y frutales. Como para quitarse el sombrero al recordar las pequeñas historias que se confabularon para hacer posible tamaño regalo. En el siguiente capítulo iniciaremos la revisión de la biota animal del Cretácico, dejando todo lo relacionado con los mamíferos para uno posterior.

NOTAS DEL CAPÍTULO 43:

1. "*Montsechia, an ancient aquatic angiosperm*", Bernard Gomez. Podéis encontrar los detalles en esta publicación de PNAS de septiembre de 2015.

2. "*Cretaceous forest composition and productivity inferred from a global fossil wood database*", Emiliano Peralta-Medinay Howard J. Falcon-Lang, publicado en la revista Geology de octubre de 2011.

3. "*Angiosperm-like pollen and Afropollis from the Middle Triassic (Anisian) of the Germanic Basin (Northern Switzerland)",* Peter A. Hochuli y Susanne Feist-Burkhardt**.** Podéis encontrar más información sobre este estudio en la publicación de Plant Science de octubre de 2013.

4. "*Transcriptional signatures of ancient floral developmental genetics in avocado (Persea americana; Lauraceae)",* André S.

Chanderbali et al. Lo encontraréis en esta publicación de PNAS de junio de 2009.

5. "*Modularity of the angiosperm female gametophyte and its bearing on the early evolution of endosperm in flowering plants*". Podéis encontrar el trabajo de Ned Friedman y Joseph H. Williams en esta publicación de la revista Evolution de diciembre de 2009.

44. La biota animal en el Cretácico

El anterior capítulo nos introdujo al periodo Cretácico. Sabíamos algo de él, ya que en uno anterior habíamos hablado de la conquista del aire por parte de los dinosaurios, suceso que aconteció en pleno Cretácico. Ahora vamos a continuar para iniciarnos en el mundo de la biota animal, cosa que completaremos con una breve reseña de todo lo que se mueve… a excepción de los mamíferos, a los que dejaremos para estudiarlos más en detalle en el capítulo 45 siguiente.



Comenzaremos en el mar.

Los microorganismos experimentaron grandes cambios a partir del Cretácico medio. Con seguridad, por las altas temperaturas de las aguas y, posiblemente, también motivado por los cambios en la química de los mares.

Por un lado, las aguas superficiales debían contener un *porcentaje elevado de nutrientes*, ya fuera por los arrastres terrestres producidos por las abundantes lluvias o como consecuencia del anegamiento de viejas tierras al subir el nivel de los mares. O también por el reflotamiento que se produjo de sedimentos marinos. En el capítulo anterior ya comentamos que en los mares cada vez más cálidos del

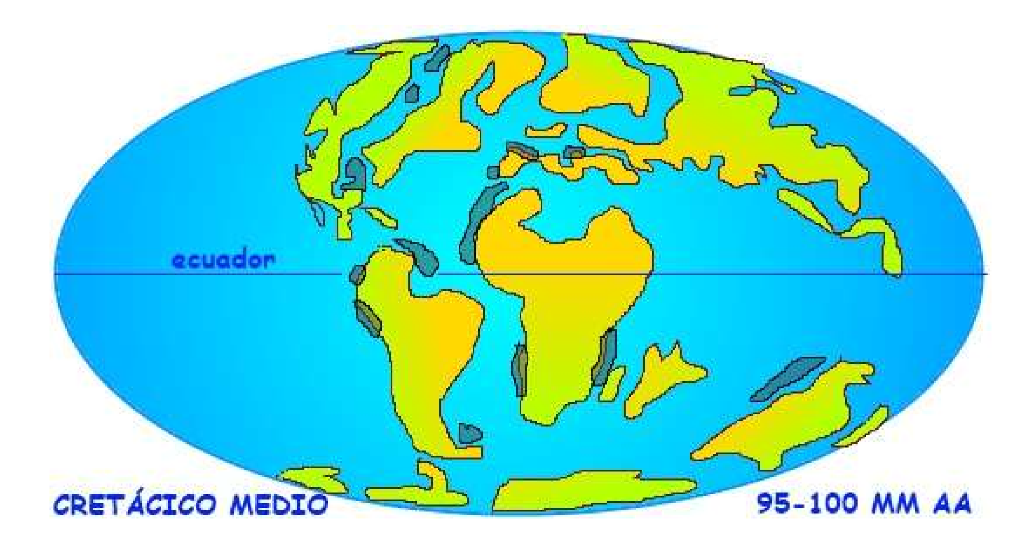
Cretácico, se iba incrementando la concentración de sales en las aguas superficiales. Su mayor densidad hacía que descendieran a cotas inferiores, a pesar de su elevada temperatura. Como consecuencia de ello se producían afloramientos de agua "fría" de los fondos, lo que reflotaba sedimentos fértiles de las plataformas costeras que se habían ido acumulando tras millones de años de arrastres. Por otro lado, en las nuevas cortezas continentales se *liberaba cada vez más hierro* que se disolvía en las aguas oceánicas. El hierro es un nutriente esencial para las algas, por lo que se considera que este fenómeno pudo ser también decisivo en el auge de los microorganismos marinos.

Todo ello llevaría a un *descontrolado crecimiento de la actividad biológica* en las aguas superficiales, lo que unido a las elevadas concentraciones de nutrientes tuvo como consecuencia un importante agotamiento del oxígeno. En aquellos momentos la *anoxia* -baja presencia de oxígeno- se daba en extensas zonas oceánicas, y no sólo se debía a causas orgánicas sino también al influjo del clima.

Las *condiciones de temperatura de las aguas oceánicas* actuaban en favor de la anoxia. En la recalentada agua de la superficie se diluiría mal el oxígeno atmosférico por lo que difícilmente podría difundirse hasta las aguas más profundas. A ello se le unía el hecho ya comentado de que, en los templados trópicos, las aguas incrementaban la concentración de sal por la sobreevaporación, lo que favorecería el hundimiento de esas aguas pobres en oxígeno, extendiéndose la anoxia de la superficie a los fondos. Podríamos pensar que en una época de intensa pluviometría como era aquella, en las extensas zonas marinas donde las lluvias caían abundantes, frías y con oxígeno, se invertiría la situación anterior. Pero no era así, ya que el principal efecto que inducían las aguas frías y dulces de la lluvia se concretaba en la dilución de la salinidad en superficie. A pesar de que por convección las aguas enfriadas de la superficie tenderían a bajar al fondo más cálido, parece ser que este fenómeno era sobrepasado negativamente por la disminución de la densidad.

Todo ello favorecía la estratificación de las primeras capas de agua, por lo que estas permanecería estáticas y sin producirse hundimiento de volúmenes que trasladaran oxígeno, aunque fuera escaso, a los niveles inferiores.

Se sabe que hace 94 millones de años tuvo lugar el momento en que la anoxia fue mayor. La precariedad del oxígeno en el agua provocó una gran mortandad de bacterias aeróbicas y por el contrario una proliferación de un tipo de arqueas menos termófilas que la mayoría de la población existente, un tipo de diminuto plancton marino, unicelular, con un metabolismo que no se apoyaba en el oxígeno molecular y que conseguía la energía a partir de la de los enlaces químicos de ciertos compuestos inorgánicos.[1]



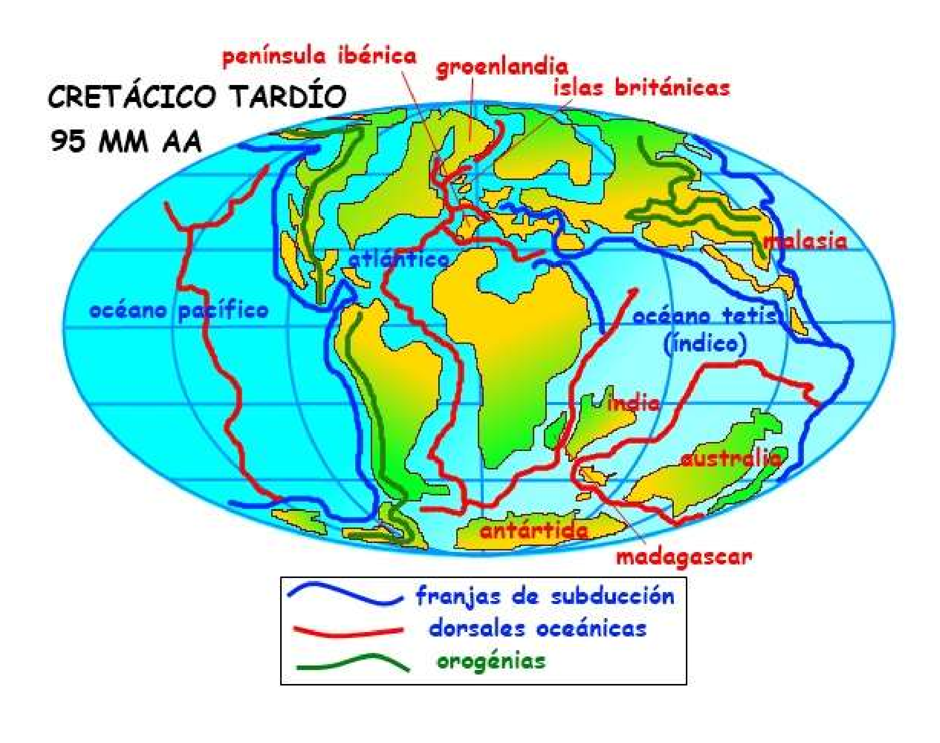
Regiones de sedimentación de calizas negras durante el Cretácico medio

La muerte de las bacterias aeróbicas tuvo como consecuencia una intensa deposición y enterramiento de materia orgánica sin descomponer, que en muchas regiones, como los mares de aguas poco profundas, formó grandes depósitos de calizas negras con un 80% de materia orgánica, que es la que da el color oscuro. Hasta el 80% de los compuestos orgánicos detectables en estos esquistos negros parecen haber sido productos de la degradación de los lípidos estructurales de las membranas de estas arqueas. También algunos

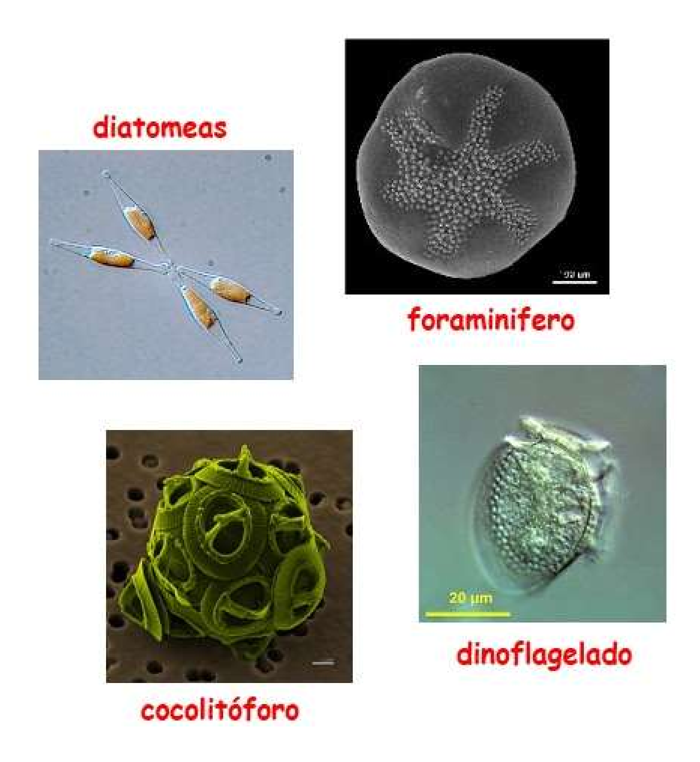
de los compuestos orgánicos encontrados en estas calizas corresponden a biomarcadores de cocolitóforos, un tipo de algas muy especiales, como veremos a continuación.

Un inicio distinto, pero con un final parecido, es el que tuvo la actividad biológica en la franja específica de la superficie de los océanos. En un ambiente de aguas calientes, con toda la luz solar y una completa disponibilidad del oxígeno atmosférico, proliferó el plancton cuyos individuos fueron evolucionando hacia formas y estructuras semejantes a las de las morfologías modernas. Las algas diatomeas, que generalmente eran del tipo silíceo más que calcáreo, y los dinoflagelados, unos protistas normalmente unicelulares con flagelo, experimentaron una tremenda expansión poblacional.

En los mares comprendidos en la franja tropical norte, Tetis y parte del Atlántico Este, el rebosante microplancton se convirtió en petróleo y areniscas bituminosas a mediados del Cretácico, durante el intervalo comprendido entre hace 120 y 75 millones de años. El 60% de las reservas conocidas de petróleo se generaron en esta época: el Golfo Pérsico, norte de África, Golfo de México y Venezuela.



Relacionado con todo lo anterior está el hecho de la proliferación de microorganismos mineralizados durante todo este periodo. Casi a inicios del mismo se observa en la biomasa marina un marcado incremento de especímenes con esqueletos mineralizados. Es un fenómeno que recuerda lo que pasó durante los primeros años del Fanerozoico, durante la explosión cámbrica. En los inicios de aquel momento la respuesta biológica llevó a la evolución de los "pequeños fósiles con concha" (*small shelly fossils*). Ahora en el Cretácico el episodio se concreta con la aparición de nuevos foraminíferos ("*los portadores de agujeros*" por donde asomaban pseudópodos que utilizaban para capturar alimento y moverse), algas diatomeas y cocolitóforos, que con este raro nombre no dejan de ser otro tipo de algas que llevaban unas escamas de carbonato cálcico, los "cocolitos".



Pequeños microorganismos del Cretácico que desarrollaron una mineralización (imágenes de wikimedia, dominio público, CC BY 2.5 Generic y CC BY-SA 3.0 Netherlands)

Pudiera ser que este incremento de microorganismos mineralizados fuera motivado por algo que ya ocurrió también en el Cámbrico. Las

rocas que recién formaban la corteza oceánica presentaban una tendencia a la absorción del magnesio en contraposición a la del calcio, con la consecuencia de que más iones de este último quedarían libres disueltos en el agua. En aquel momento Pangea se estaba acabando de abrir siguiendo múltiples dorsales submarinas, en donde se generaba nueva corteza como consecuencia de la intensa exudación de magma que se vertía a través de ellas. Con seguridad ello llevó a un incremento de la concentración del calcio en las aguas a expensas de una disminución de la del magnesio. La calcita resultante de la cristalización de este extra de iones calcio es un mineral muy estable, y por tanto con larga vida en el escaparate para el que lo quiera aprovechar. La selección natural hizo el resto, ya que el hecho de desarrollar un esqueleto mineralizado prestaba al individuo que lo intentaba una serie de ventajas que no eran exclusivamente las relacionadas con la defensa y protección. También se favorecían las relaciones simbióticas al poder entrelazarse los exoesqueletos calcáreos mediante sus agujas, poros y desigualdades, a la par que por las mismas razones se disponían en ellos de un almacenamiento supletorio de materiales útiles. Y aún más ya que servía para controlar la flotabilidad al poder almacenar más o menos aire en sus porosidades. Su variada composición química les suministraba una adicional reserva intracelular de iones como podía ser el del litio, muy activo en los procesos metabólicos.

La superabundancia de estos microorganismos, unida a los altos niveles de los mares que dejaban grandes extensiones de aguas relativamente poco profundas a finales del Cretácico, favoreció la sedimentación de los restos minerales de cocolitóforos y compañía. El resultado han sido los gruesos depósitos de calizas marinas y de creta, una arcilla blanca de tipo calizo que se usa para fabricar la tiza para escribir en las pizarras escolares, y que dio nombre al periodo, como ya se comentó en el capítulo anterior. La distribución de estos depósitos es muy extensa y variada. En el noroeste europeo se formaron los famosos acantilados blancos de Dover, en las costas

meridionales de Inglaterra, así como similares formaciones en la costa francesa de Normadía.



Acantilados cretácicos de Dover (Wikimedia, CC BY-SA 2.0 Generic)

Por debajo de este rico mundo del plancton había otro biotopo lleno de vida. En este entorno se va a culminar lo que venía arrastrándose desde el vacío que provocó la crisis del Pérmico-Triásico y que se conoce como la Revolución Marina del Mesozoico ¿qué subyace en tal revolución?

En el mar se van a cambiar las morfologías y hábitos vitales de los animales de la fauna evolutiva del Paleozoico -estructura braquiópoda-, que a su vez había sustituido a la del Cámbrico -estructura trilobite-, dando lugar a lo que se conoce como la fauna evolutiva moderna -estructura molusco-. Y todo debido a que el nuevo escenario ambiental, que prácticamente había partido de cero tras la mencionada crisis, provocó una carrera armamentística entre los posibles predados que iban incrementando sus defensas minerales y los posibles predadores que cada vez disponían de herramientas más especializadas y potentes para la rotura de conchas. Se observa en este periodo, el Cretácico, un incremento desmesurado de ese tipo de predadores, los durófagos, abarcando todo el abanico animal marino desde invertebrados hasta vertebrados e incluso aves. Eso motivó también unas modificaciones

en cierta fauna submarina que se concretaron en la desaparición o la emigración de las especies más desprotegidas, braquiópodos o crinoideos, hacia zonas más profundas.

Mientras los braquiópodos entraban en franca regresión, los ammonoideos cambiaban su aspecto hacia formas extrañas y se veían acompañados por los belemnites, otro tipo de molusco cefalópodo pero con una concha interna. Ambas familias duraron lo que duró este periodo, es decir, desaparecieron con la extinción masiva de la frontera cretácico/terciario.

Aparecen nuevos moluscos gasterópodos que se diferencian de sus antepasados porque son ferozmente carnívoros: perforaban conchas y succionaban la carne del pobre inquilino, y también tenían la capacidad de paralizar a sus presas con tóxicos, lo que les permitía "tragarse" pequeños peces.



Arrecife fósil del Cretácico formado por moluscos Hippuritoida. En la parte inferior el fósil de uno de estos animales (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Pero no eran los únicos predadores, ya que las poblaciones de crustáceos en el Cretácico estaban constituidas por verdaderos cangrejos y langostas que abrían las conchas de los moluscos forzándolas con sus pinzas. Sus presas bivalvos "tomaron" serias decisiones para escapar de la quema: para escapar, o bien se enterraban cada vez más profundamente en las arenas, o bien desarrollaron conchas muy macizas o espinas para disuadirlos. ¡Algunos poseían valvas de casi 1,8 metros de longitud!

En los arrecifes había una seria competición. Los principales constructores de estas estructuras no eran los corales, que ya presentaban morfologías modernas: la mayoría de los arrecifes del Cretácico fueron formados por grandes moluscos bivalvos *Hippuritoida* que tenían una concha con forma de cono de hasta un metro de altura, con la que solían estar sujetos al sustrato, y la otra concha libre que hacía de tapa. Vivían en aguas someras agrupándose numerosos individuos, entre los que se consolidaban los sedimentos reforzando las colonias. Posiblemente esta cooperación fuera el resultado de una estrategia defensiva pasiva.



Esqueleto de Mossasaurus hoffmannii. ¡Bonita boca! (Wikimedia, dominio público)

Y entre el plancton flotante y los arrecifes y arenas del fondo, en las aguas intermedias comenzaron a ser comunes las rayas, los tiburones y los teleósteos, todos ellos de gran tamaño, que sustituyeron a los regresivos ictiosaurio y plesiosaurio. Realmente parece que en el mar se estaba reproduciendo el gigantismo que se observaba en tierra. Grandes tortugas de tres metros de longitud, unos teleósteos de hasta cuatro metros, los plesiosaurios con doce metros, los nuevos lagartos fluviales mosasauridos, que alcanzaron longitudes de 17 metros, …

Nos vamos a tierra.

Iniciaremos el paseo de la mano de los **insectos,** con un apunte sobre los lepidópteros, mariposas y polillas, cuyo esplendor como animales *succionadores* dotados de una probóscide se manifiesta en esta época al calor del desarrollo de las angiospermas y sus flores. Sus raíces son más antiguas ya que se estima que este orden de insectos pudo surgir a finales del Pérmico o inicios del Triásico, quizás como especies relacionadas con las viejas "*moscas escorpión*", de las que hablábamos en el capítulo 40 dedicada al Jurásico. Los primeros fósiles conocidos de los lepidópteros son de hace entre 130 y 110 millones de años y corresponden a un individuo de la especie *Zygaena turolensis*.[2]

De inicios del Cretácico son también los primeros insectos *parásitos* de los vertebrados de sangre caliente, antepasados de pulgas y piojos. Los fósiles más antiguos de estos animales son los de *Tarwinia australis*, con una antigüedad entre 122 y 112 millones de años. Aunque *Tarwinia* no tenía aún desarrollados los músculos de las patas que hacen de las pulgas actuales unas saltadoras olímpicas. Esta habilidad llegaría más tarde.

No nos podemos olvidar de los himenópteros, cuyo esplendor se dio durante el Cretácico. Las abejas y las hormigas emergieron a mediados del periodo coincidiendo con la aparición de las plantas con flores. Como ya sabíamos del capítulo anterior, no nos extraña

el comprobar cómo la aparición y la divergencia de las abejas, que se produjo hace unos 110 millones de años durante el Cretácico, haya coincidido con una de las radiaciones más notables dentro de las plantas, la de las angiospermas, acontecida en la misma época. Evidencia de un completo proceso de evolución armonizada entre insectos y plantas.

El fósil más antiguo de abeja que se conoce data de mediados del Cretácico, hace unos 100 millones de años, y corresponde a una *Melittosphex burmensis* que murió en una gota de ámbar. Se encontró en Birmania. En sus patas conserva dos caracteres ancestrales de transición entre otros grupos de himenópteros semejantes a las avispas y las más modernas abejas.[3]



Fósil conservado en ámbar de la abeja Melittosphex burmensis (Science, ver nota 3 a pie de capítulo, fair use)

El *comportamiento social* en los insectos, con un complejo sistema de castas que realizan trabajos especializados, apareció varias veces, primero en las hormigas y avispas a mediados del Cretácico y

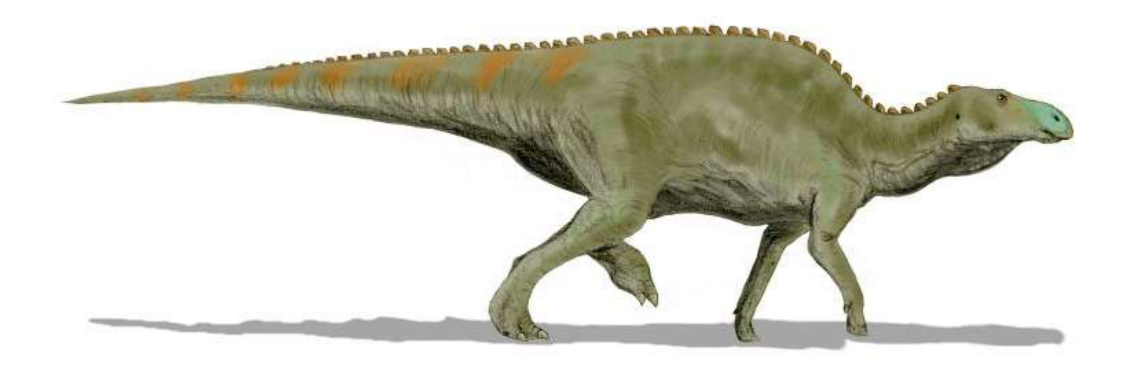
después en las abejas a finales de este período. En las rocas calizas del monte Montsec, en la provincia española de Lérida, se han encontrado las termitas más antiguas conocidas. Allí también se ha encontrado el fósil de una termita en ámbar que claramente era una obrera y por lo tanto perteneciente a un grupo social, lo que representa el primer registro fósil de este tipo. Este yacimiento está datado en el Cretácico inferior.[4]

Hay una gran ventaja para estos insectos -termitas, hormigas y abejas- en el hecho de haber formado sociedades con organizaciones de alto nivel de complejidad. Gracias a estas estructuras sociales han llegado a la optimización de la reproducción, la defensa colectiva y la obtención y procesado del alimento que les ha llevado a un puesto clave en el dominio ecológico de nuestro planeta. Baste para calibrar este éxito el saber que el peso de todas las hormigas en el momento actual puede ser equivalente al peso de todos los humanos. El significado de esta conquista es tal que para el prestigioso genetista John Maynard Smith el paso de individuos solitarios a colonias es una de las ocho transiciones esenciales de la evolución. Ya comentamos en el capítulo 23 las teorías del biólogo evolutivo británico William D. Hamilton con las que explica el porqué del comportamiento social de algunos insectos y que se resume en que es un sistema muy eficaz para transmitir el acervo genético de estas especies. Para quien esté interesado en este tema recomiendo la lectura del artículo del biólogo Ignacio Fernández Escudero "*Evolución de la eusociabilidad en los insectos*".[5]

Pero no todo fueron buenas noticias para los insectos del Cretácico. Recordemos del capítulo 42 que en estos momentos hacía su aparición el *Archaeopteryx* y sus amigos voladores. Su presencia en el rol de actores de la biosfera no fue una noticia agradable para todos. Unos pocos quedaron afectados de una manera muy negativa. Entre ellos destacamos a los insectos. Suponemos, y tenemos explicaciones para ello, que su tamaño iba parejo a la evolución de la concentración atmosférica del oxígeno. En el Jurásico sabemos también que este gas recuperó una senda alcista -que continuó en el

Cretácico-, por lo que podríamos pensar que en este momento los insectos deberían haber vuelto a sus épocas de gigantismo glorioso. Pero no fue así. El registro fósil demuestra que por lo general disminuyeron de tamaño. Y esto fue así por la nueva destreza que apareció con los reptiles voladores, tipo pterosaurio, o con las nuevas aves. Por razón de competencia dentro de los mismos nichos o por razón de depredación, la selección natural hizo que los insectos voladores disminuyeran su tamaño para mejorar la maniobrabilidad del vuelo y por tanto abrir espacios a nuevas oportunidades, a pesar del impulso que recibían del oxígeno. Algo parecido sucedería más tarde durante los primeros millones de años de la siguiente era, el Cenozoico, el momento en que se produce la gran diversificación de las aves modernas y la aparición de los primeros mamíferos voladores, los murciélagos, que es cuando se constata en el registro fósil la desaparición de los insectos planeadores.

Y ahora dejemos los pequeños insectos y visitemos a los mayores del patio. En estos años los **dinosaurios** consolidan su dominio, siendo el Cretácico el periodo en el que alcanzaron mayor auge y desarrollo. En aquellos momentos coincidían una gran cantidad de especies con modos de vida y morfologías muy dispares, que han dado pie a kilómetros de publicaciones, por lo que sólo daremos una breve pincelada particular de cada uno de sus subgrupos de los que ya hablamos profundamente en el capítulo 41 sobre el Jurásico.



El Edmontosaurus un ornitópodo del Cretácico (Wikimedia, GFDL 1.2)

En los paisajes norteamericanos abundaban los ornitópodos, un infraorden de los ornitisquios, los "*cadera de ave*". Los ornitópodos o "*pies de ave*" tenían un pie con tres dedos. Eran herbívoros y desarrollaron un sistema masticatorio y digestivo muy evolucionado, parejo al de las actuales vacas. Inicialmente eran bípedos, con una larga y fuerte cola que les servía de balancín durante la marcha, pero con el tiempo adoptaron el desplazarse a cuatro patas, posiblemente porque les resultaba más fácil el comer la vegetación del suelo.

En el sur, en Gondwana, era frecuente el *Titanosauru,* que era un dinosaurio de la infraorden saurópoda de los saurisquios, los ya conocidos "*cadera de lagarto*". Era un cuadrúpedo herbívoro de cuello muy largo.

Debemos hacer también una pequeña mención a la otra infraorden saurísquida, la de los terópodos -los "*pies de bestia*"-, todos ellos carnívoros, para no olvidarnos de uno de los dinosaurios más afamados, el *Tirannosaurius rex*. Con sus enormes medidas, trece metros de longitud, cinco de alto y cinco toneladas de peso, era uno de los depredadores más sanguinarios de finales del Cretácico.

Debemos dejar ya a los dinosaurios, lo que hacemos con un cierto sentimiento de nostalgia, pues estos tremendos e importantes animales que impusieron su ley no sólo por la fuerza, sino por su capacidad de adaptación e inteligencia, sobrevivieron con éxito en un variado muestrario de hábitats y con un variado abanico de costumbres y formas de vida. Despidámonos de ellos dejando volar de nuevo la imaginación sobre un ¿por qué no? posible paisaje del Cretácico.

Un día tranquilo junto a una de las innumerables llanuras que habían quedado anegadas por la subida de las aguas durante el Cretácico. El cielo lleno de cirros aseguraba un día primaveral. Un bosque de coníferas llega junto a la orilla. A los pies de éstas unos helechos

herbáceos exuberantes por la continua humedad en el subsuelo donde enraízan.



Representación artística de una escena cretácica (Imagen: José Miguel Pino, fair use)

Por la orilla merodea un "*garra pesada*", un *Baryonyx*, que a pesar de su apariencia fiera y depredadora se alimenta sólo de pescado. Su paso no ha dejado indiferentes a los que estaban aún cargando las pilas bajo el débil sol de la mañana. Pero no parecen asustados, sólo curiosos ante la aparición del dinosaurio. La tortuga en último término escapará escondida entre las matas de los equisetos que crecen inhiestos, a sus espaldas. Bien pudiera ser una *Salasemys pulcherrima* o "*tortuga preciosa de Salas*" de los Infantes, Burgos, en donde se encontraron fósiles de sus "tataramuchosnietos". Un pequeño cocodrilo *Goniopholis*, ya que sus mayores llegaban a los cuatro metros, apenas se inmuta en su descanso, varado en las aguas cálidas de la orilla, buena costumbre que continuará en la historia de la familia como hacen hoy en día sus primos del Nilo. En el centro de la imagen, en un segundo plano, un grupo de iguanodones se dirige a abrevar tras haber alimentado su cuerpo de tres toneladas

con abundante follaje. Más al fondo un viejo y cansino *Rebbachisaurus* cruza el brazo de agua, parece que con morriña de su patria africana, de donde la licencia del dibujante, o del narrador, le ha sacado para ponerle sobre un paisaje castellano. En el cielo, una pareja de pterosaurios *Ornithocheirus* vuelan con dificultad. Debían haber recogido una ráfaga del embate, ya que eran bastante torpes y no les resultaba fácil levantar del suelo. Ahora planeaban desmañados con la urgencia de encontrar un lugar adecuado para posarse. No son los únicos en el cielo, que comparten con un *Ichthyornis*, el "*ave pez*", muy parecido a una moderna gaviota. En primer plano aparece la sofisticación del Cretácico: las primeras flores primaverales de una angiosperma.

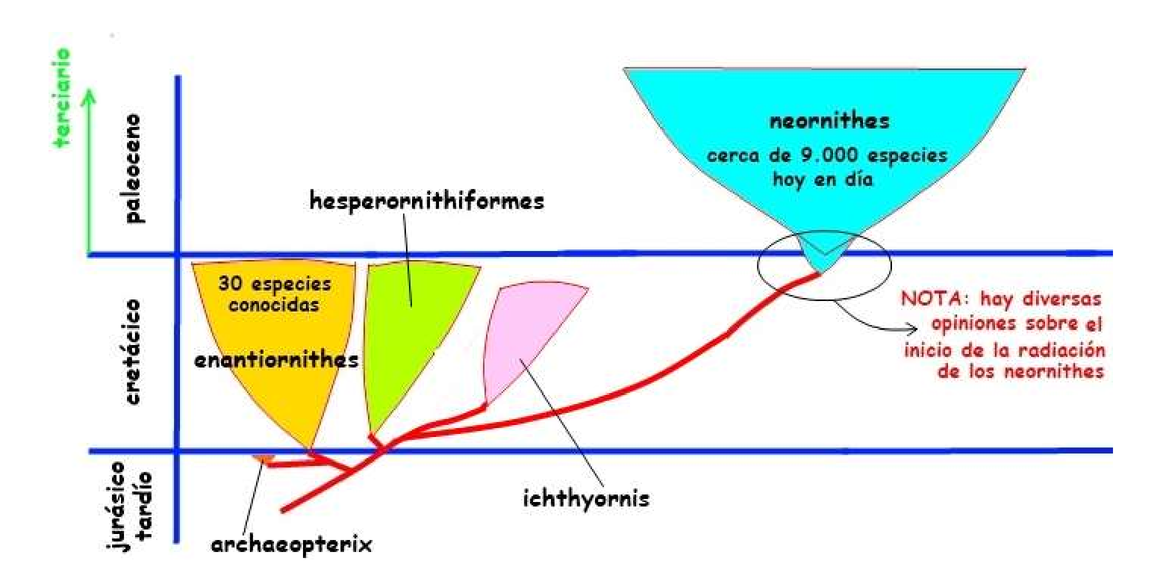
Por desgracia hay que despedirse de esta variada comunidad, sobre todo de los dinosaurios. Les quedaba poca historia que vivir, ya que la extinción de finales del periodo se llevó por delante a la mayoría para no aparecer nunca más. Sólo quedará el recuerdo de algunos de ellos en las aves.

Pero no adelantemos las malas noticias y hablemos ahora de estas últimas, las vitales aves impulsadas por un volcánico metabolismo de sangre caliente. Se diversificaron en un amplio abanico de formas a lo largo del Cretácico. Muchas mantuvieron las características primitivas, como el *Archeaopteryx*, con su larga cola ósea, garras y dientes y, evidentemente, alas. Los dientes se fueron perdiendo progresivamente así como se fue acortando la cola.

Pero pronto se fueron cubriendo las grandes etapas que llevarían a las aves hasta las formas modernas.

El primer linaje grande y diverso de aves de cola corta que evolucionó fue Enantiornithes, que significa "*aves opuestas*", llamado así porque la construcción de sus huesos del hombro estaba invertida respecto a la de las aves modernas. Ocupó un amplio espectro de nichos ecológicos donde vivía, desde los limos hasta las arenas, sondeando en busca de pequeños animales, restos vegetales

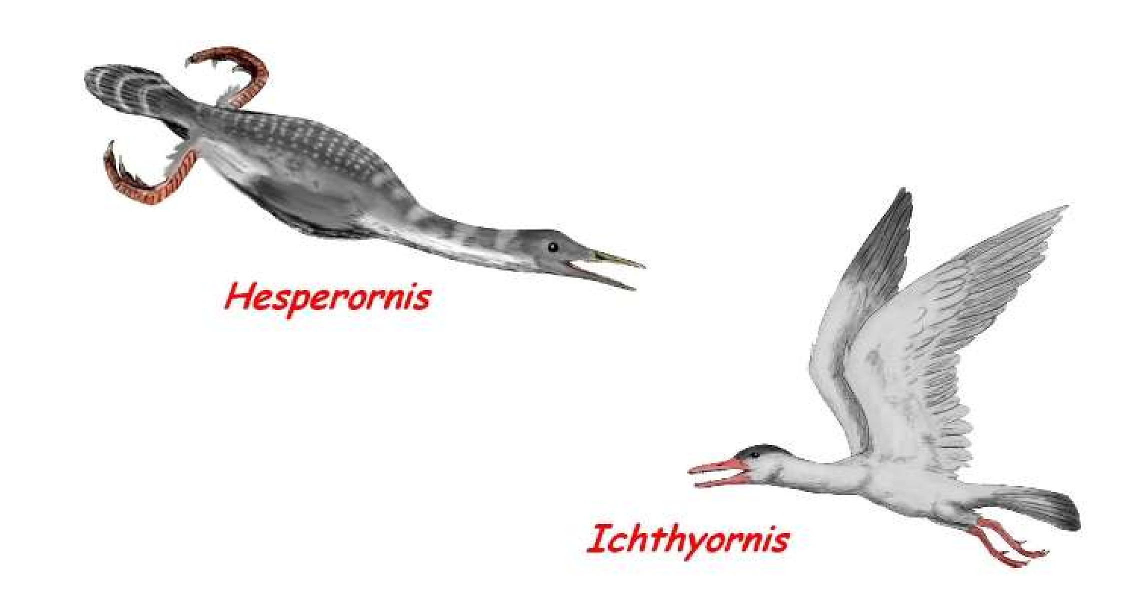
o incluso al acecho de peces, hasta las formas arborícolas y comedoras de semillas.



Esquema de evolución de la clase Aves. La anchura de las áreas da una idea aproximada de la magnitud de la diversidad en las subclases.

Más modernos en el camino evolutivo fueron los miembros de un orden de aves marinas, Hesperornithiformes, que se adaptaron tan bien a la pesca en ambientes marinos que perdieron la capacidad de volar y se hicieron básicamente acuáticos. Sus patas ocuparon una posición muy posterior de forma que les permitía un poderoso nado y buceo, aunque en tierra debían ser muy torpes. Allí se movían deslizándose, por lo que probablemente pasaban poco tiempo fuera del agua excepto para anidar. Algo semejante a los pingüinos actuales.

Por último tenemos a las *Ichthyornis* de las que conocemos numerosos especímenes y que desaparecieron hace unos 80 millones de años. Se les considera aves acuáticas del Cretácico que ocuparon nichos parecidos al de habitación de los actuales gaviotas o petreles. La estructura de sus alas y esternón son de apariencia muy actual por lo que se les debe suponer una gran habilidad voladora, lo que las situaría muy próximas a las aves modernas.



Representación artística de Hesperomis y de Ichthyornis, ambas aves del Cretácico ya extintas (Wikimedia, GFDL 1.2 y CC BY 3.0)

Tras ellas nos encontramos con las Neornithes que son ya las primeras aves modernas antecesoras de todas las actuales. Antes del fatídico episodio que veremos en el capítulo siguiente y que fija la frontera geológica entre el Mesozoico y el nuevo Cenozoico, ya se habían desgajado de la rama las gallináceas y las anseriformes. De estos últimos se conoce un fósil encontrado en la península Antártica de *Vegavis iaai* que vivió hace unos 65 millones de años.

Procede ya ir cerrando con el último párrafo de este variado capítulo, en el que nos hemos encontrado con las tremendas vicisitudes sufridas por los microorganismos planctónicos en un momento en que los gasterópodos fueron casi tan feroces como los gigantes marinos que atravesaban las aguas. Luego hemos visitado a los insectos cuando aparecieron las abejas que amablemente nos han dado pie para introducir las costumbres sociales de algunos de estos ubicuos animales. Tras un breve repaso a los tres órdenes base de los dinosaurios cretácicos, hemos acabado descendiendo los también tres últimos escalones que siguieron las aves antes de convertirse en las más de 10.000 especies de hoy en día. Les quedaba pasar la frontera del terror cósmico. Pero esto último será objeto de un

capítulo posterior. Antes, en el siguiente, aún debemos completar el viaje por la biota del Cretácico hablando de los mamíferos.

NOTAS DEL CAPÍTULO 44:

1. "*Widespread occurrence of structurally diverse tetraether membrane lipids: Evidence for the ubiquitous presence of low-temperature relatives of hyperthermophiles*", Stefan Schouten et al. Más información al respecto en esta publicación de PNAS de diciembre de 2000.
2. "*Las mariposas fósiles. Razones de su escasez y su influencia sobre el conocimiento de la filogenia y distribución de Zygaenini (Lepidóptera: Zygaenidae)",* Fidel Fernández-Rubio. Más información en este boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa de 1999.
3. Más información al respecto en esta publicación, "*A Fossil Bee from Early Cretaceous Burmese Amber*", G. O. Poinar Jr. y B. N. Danforth, de la revista Science de octubre de 2006.
4. "*The Oldest Known Record of Social Insects*", Xavier Martínez-Delclòs y Jordi Martinell. En esta publicación de la revista Journal of Paleontology de mayo de 1995 podéis encontrar la información completa del tema.
5. En este boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa tenéis el artículo mencionado. "*Evolución de la eusociabilidad en los insectos*", Ignacio Fernández Escudero (1999).

45. Los mamíferos del Cretácico

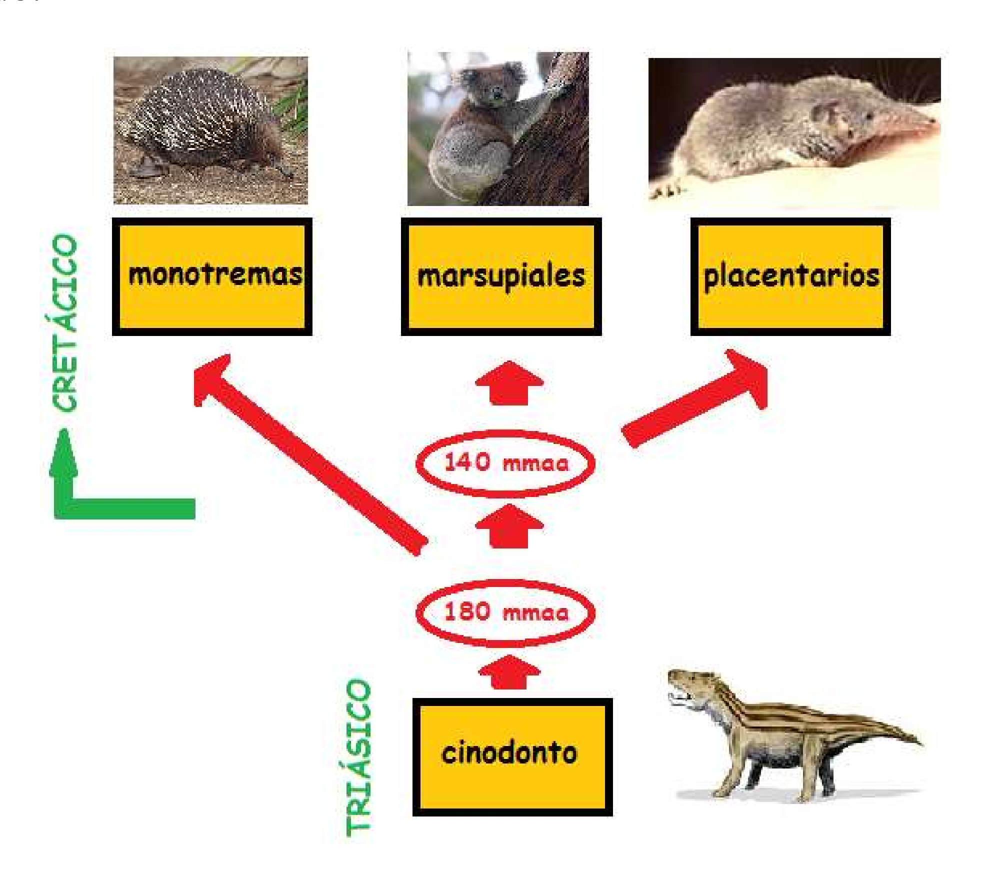
En los dos últimos capítulos nos hemos movido en los dominios del periodo Cretácico. Su geología y clima, las plantas con la nueva maravilla de las angiospermas y sus flores y frutos, para por último iniciar el conocimiento de la biota animal. Nos quedamos a las puertas de la casa de los mamíferos. En este momento retomamos la andadura acompañando a estos animales, por aquellos días pequeños, ladinos y oportunistas. La competencia obligaba a aguzar el ingenio. Seguimos entre hace 145 y 65 millones de años. La función va a empezar.

¡Ojo! …

Algo se mueve con disimulo en un rincón de la escena, algo oculto en el paisaje y en nuestro subconsciente. Algo que faltaba para completar el rompecabezas del Cretácico. Allí seguían inmersos en la oscuridad nocturna de su vida social y familiar, oído vigilante, olfato alerta, ojos escrutando los grises de las sombras, el gatillo metabólico a punto de dispararse: no, no nos hemos olvidado de los mamíferos.

No habían cambiado casi nada desde el Jurásico. Eso sí, habían evolucionado y ya era habitual el observar individuos de alguna de sus tres grandes familias actuales: los monotremas, los marsupiales y los placentarios. No nos olvidemos que por las tierras cretácicas seguían correteando también los multituberculados que ya conocimos en el capítulo 40, "*Parque Jurásico*"**.** Desgraciadamente hoy no los tenemos entre nosotros, como a sus primos, ya que desaparecieron en un momento de la siguiente era cenozoica hace unos 30 millones de años.

Habían contado con armas secretas que ya conocemos, entre otras la astucia, y con una nueva forma de conducta de apuesta segura: la *atención en el cuidado de sus crías* debió de ser decisivo para su éxito evolutivo. La alimentación parental durante la lactancia permitía al pequeño mamífero crecer hasta condiciones de adulto bajo la supervisión de sus padres. En el momento de su independencia sabía ya, por experiencia mimética, vivir como un adulto y se alimentaba como un adulto en un mundo conocido y testado.



Diversificación filogenética de la clase mamífera según cronología propuesta por el biólogo Richard Dawkins. Nuevos descubrimientos adelantan la fecha de irradiación de los marsupiales a un momento anterior a los 160 mmaa (Imágenes a partir de wikimedia, CC BY-NC 3.0 y CC BY-SA 3.0 Unported)

Esto suponía una gran ventaja frente al hacer de los reptiles, que nacen de un huevo como seres solitarios e independientes, como minúsculas réplicas de sus padres, en un mundo que deben investigar

por su cuenta, un mundo cambiante según van creciendo y en el que se van modificando sus necesidades, ajustadas obligatoriamente a su nivel de desarrollo de cada momento. Crecen despacio a una velocidad que depende del alimento que puedan conseguir por sí mismos, siempre en una situación de inferioridad e inseguridad, hasta que llegan a ser adultos. Qué grandes ventajas diferenciales para los mamíferos. Mamar y placentario. Animales sociales.

Como ya comentamos en el capítulo 40, los verdaderos mamíferos, herederos de los reptiles mamiferoides, habían iniciado su andadura hace quizás unos 200 millones de años, a finales del periodo Triásico. El inicio de la posterior ramificación de su árbol filogenético tuvo lugar unos 20 millones de años después.

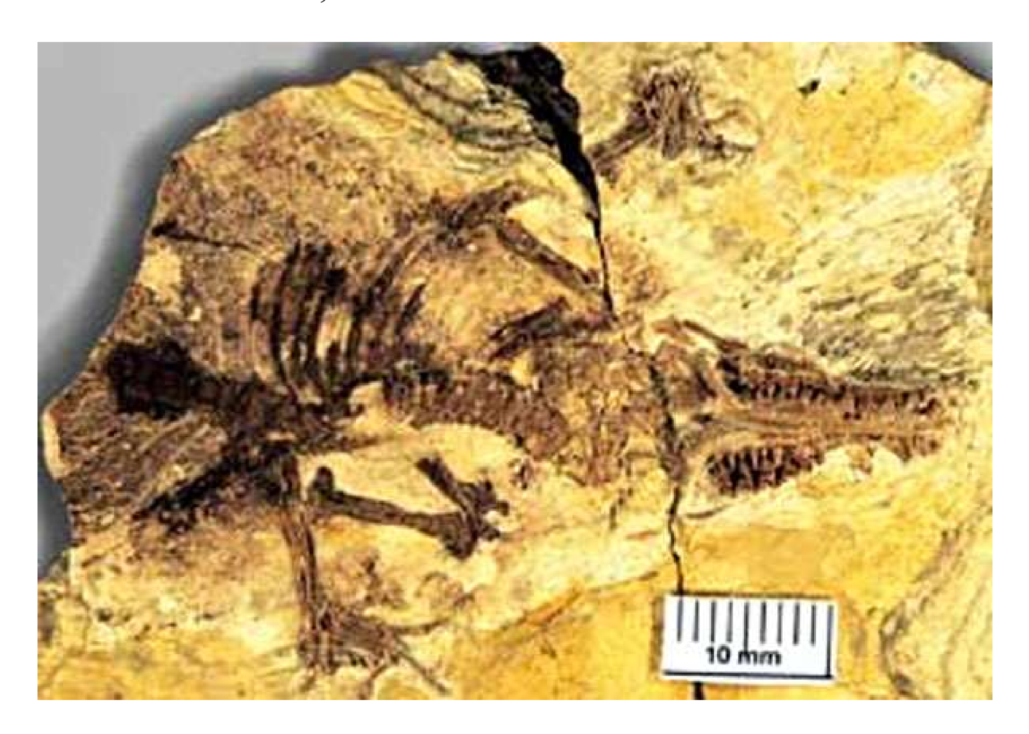
Monotremas

No sabemos datar muy bien cuando comenzó la saga de los modernos filos mamíferos. Aunque sí sabemos que todo comenzó en uno de aquellos ancestrales animales que aún se reproducía por huevos, como los reptiles, y que habitaba en un remoto territorio austral. Se trataría del patriarca inicial en la línea de los mamíferos monotremas. La primera evidencia fósil que tenemos de ellos es de hace tan sólo 100 millones de años y corresponde a un individuo antecesor de la rama del ornitorrinco.

A pesar de tener su piel con pelos, las crías nacerían de huevos y las madres se encargarían de alimentar a sus crías mediante leche proveniente de una zona de la piel plagada de glándulas excretoras sin apariencia alguna de mama. Al igual que en los reptiles, la cloaca y el conducto urinario coincidían, por eso se les ha llamado "*un solo orificio*" o monotremas. Por aquella época todos los continentes del sur estaban unidos en Gondwana, lo que permite pensar que los monotremas pudieron extenderse con facilidad por este inmenso territorio. Con el tiempo desaparecieron de África, la Antártida y Sudamérica -en Argentina se han encontrado fósiles de un ornitorrinco- sobreviviendo exclusivamente en Australia, que es

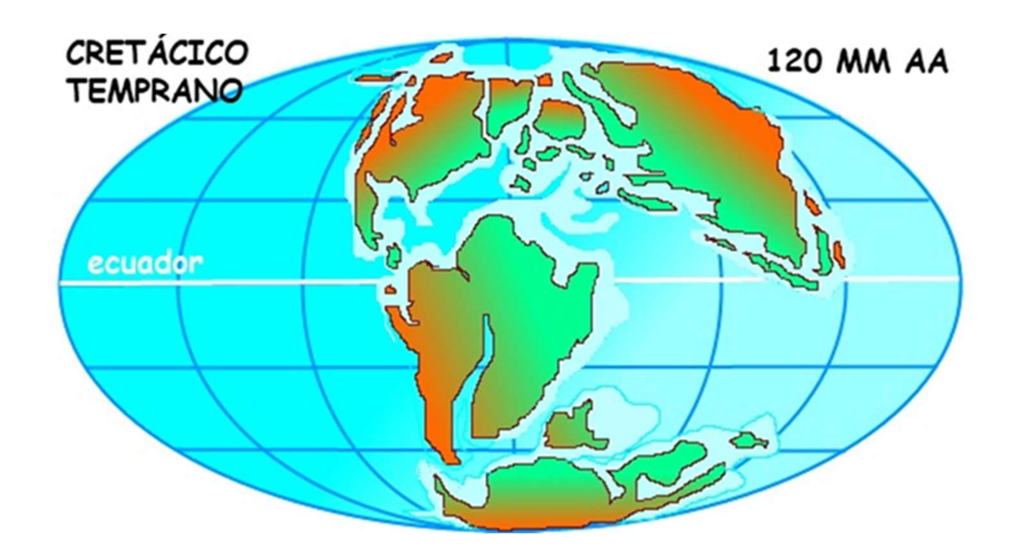
donde sus habilidades, que son muchas, fueron respetadas en su medio ambiente por la selección natural.

Con posterioridad a la radiación de la rama monotrema se produjo la separación de las otras dos subclases de mamíferos: los marsupiales y los placentarios. Como aparece indicado en varias de las figuras de este capítulo, basadas en la información que presenta el biólogo Richard Dawkins en su libro "*The ancestor's tale*", esta última radiación se produjo hace unos 140 millones de años. Sin embargo, los últimos estudios de filogenia molecular [1] parecen adelantar la fecha de separación entre marsupiales y placentarios unos 20 millones años, hasta los 160.



Juramaia sinensis un ancestral placentario de hace 160 millones de años (Imagen: Zhe-Xi Luo, ver nota a 2 pie de capítulo, fair use)

Esta circunstancia ha sido recientemente corroborada al haberse encontrado en China restos fósiles de un nuevo placentario, *Juramaia sinensis,* cuya antigüedad corresponden a esta nueva datación de 160 millones de años.[2]



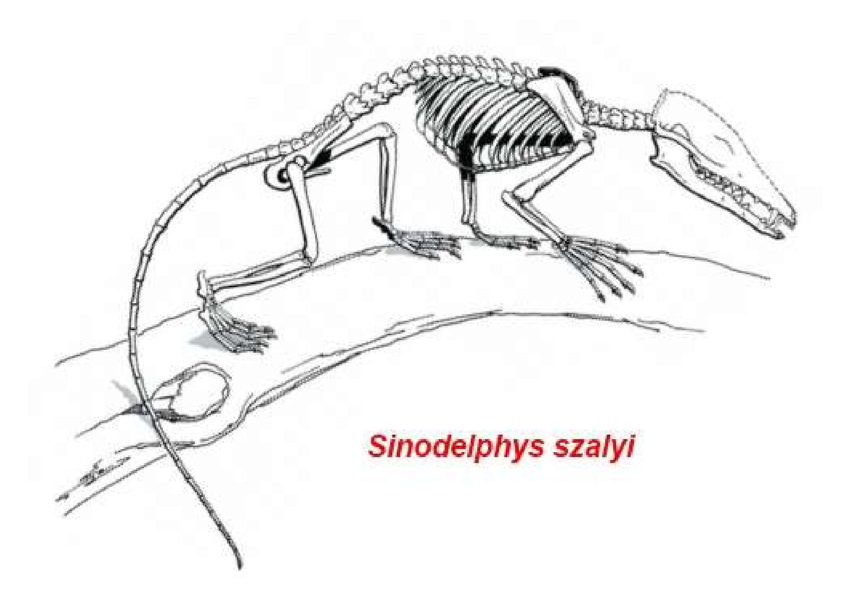
Hace 140 millones de años Gondwana se estaba partiendo en dos. Por un lado Sudamérica y África, que comenzaban a abrir brechas separadoras, y por otro lado el conjunto de Madagascar, India, Australia y la Antártida. Dos espacios aislados en donde el camino de la evolución tomó rumbos independientes.

Marsupiales

Por aquel entonces ya se había iniciado la radiación de los mamíferos marsupiales. En ellos se había producido un cambio revolucionario: una de las membranas internas del huevo se transformó para formar la placenta. Posiblemente eso sucedió al ser "infectado" el genoma de un mamífero por un retrovirus que portaba uno de los genes que tiene una función fundamental en el desarrollo de este órgano. Gracias a ello fueron vivíparos, aunque con una fase inicial de desarrollo incompleto del embrión en el útero materno. Cuando nacen lo hacen en un estado muy poco desarrollado, arrastrándose hasta la bolsa marsupial siguiendo un rastro de saliva que deja la madre, donde se encuentran los pezones a los que se fijan, permaneciendo allí durante un largo periodo de maduración.

La especie marsupial más antigua conocida se ha descubierto en China, en la misma formación de Yixian que ya conocimos al hablar de las plantas angiospermas en el capítulo 43. Corresponde a un fósil de 125 millones de años. Se trataría de *Sinodelphys szalyi,* un

pequeño animal de unos 15 centímetros con costumbres arborícolas.[3]



(Imagen: Zhe-Xi Luo et al., ver nota 3 a pie de capítulo, fair use)

Durante el Cretácico tardío se observa una distribución generalizada de este tipo de mamíferos, los marsupiales, por los continentes boreales antecesores de los actuales Norteamérica, Europa y Asia. Incluso se han encontrado indicios en Sudamérica. Dada la abundancia de fósiles en Norteamérica, hasta ahora se suponía que los marsupiales iniciaron su andadura en ese territorio, pero después del descubrimiento en el yacimiento chino de Yixian no está tan claro.

Hacia finales del Cretácico se cree que se ralentizó la actividad volcánica en las dorsales oceánicas, que así se hundieron bajo su propio peso. La consecuencia, observable geológicamente, fue una regresión generalizada de los mares que dejó al descubierto nueva superficie de tierras. Gracias a ello, a partir de Eurasia y a través del "istmo" de Bering los protoplacentarios, primitivos ungulados, colonizaron la antigua Norteamérica. Seguramente la presión de estos últimos con similares hábitos de alimentación hizo que los exitosos marsupiales de esta zona desaparecieran y emigraran hacia el sur, iniciando la colonización del ala sudamericana de Godwana,

de forma que llegaron a su extremo sur hace unos 40 millones de años. Aprovechando aún la cercanía de los continentes, saltando de isla en isla o arrastrados sobre un tronco a la deriva, emigraron a través del territorio común antártico, de forma que 10 millones de años más tarde habían llegado a Australia. De hecho se han encontrado fósiles de esta época [4] en la isla Seymour, situada en el extremo norte de la península Antártica. Parece ser que los marsupiales australianos actuales derivarían de un único antecesor sudamericano del que procederían todos los marsupiales conocidos hoy en día.[5]

En la actualidad Australia y Nueva Guinea son los principales espacios en los que viven estos mamíferos; a los que hay que añadir las abundantes zarigüeyas o los menos extendidos monitos del monte, comadrejitas trompudas o yacas, todos ellos habitantes de la patria de origen, Sudamérica. En cada uno de estos territorios aislados tuvieron una evolución diferente y paralela como marsupiales. Además, como no había una competencia con los mamíferos placentarios que prosperaban por Laurasia y África, evolucionaron en cada uno de los nichos ecológicos -marismas, estepas, bosques- hacia formas morfológicamente muy semejantes a las que habían llegado los mamíferos del norte en nichos semejantes de su territorio. Un claro ejemplo de evolución convergente, de la que ya se habló en el capítulo 21.

Placentarios

Por último, los **placentarios**. Ya hemos comentado que los últimos datos parecen corroborar que surgieron en algún momento hace más de 160 millones de años, presentando una importante innovación en la evolución de los mamíferos: la placenta, que permitía la alimentación, respiración y excreción del feto dentro del útero materno, prolongando considerablemente el tiempo de gestación. Ellos abrieron paso a la evolución de la mayor parte de los mamíferos actuales, entre los que se encuentra el ser humano.

Como en el caso de la separación filogenética de marsupiales y placentarios, la datación de la diversificación de los placentarios también está sujeta a la incertidumbre. Hay un estudio [6] de la bióloga norteamericana Maureen O'Leary, publicado en 2013, realizado a partir de la información que proporcionan antiguos fósiles y animales de hoy en día. Se ha analizado no sólo aspectos de su diversidad genética, sino también se han teniendo en cuenta cientos de sus características morfológicas. Las conclusiones parecen asegurar que la aparición del primer placentario se produjo en un plazo muy breve tras la extinción del Cretácico/Terciario (de la que hablaremos en el próximo capítulo), en la que desaparecieron los dinosaurios hace unos 65 millones de años.

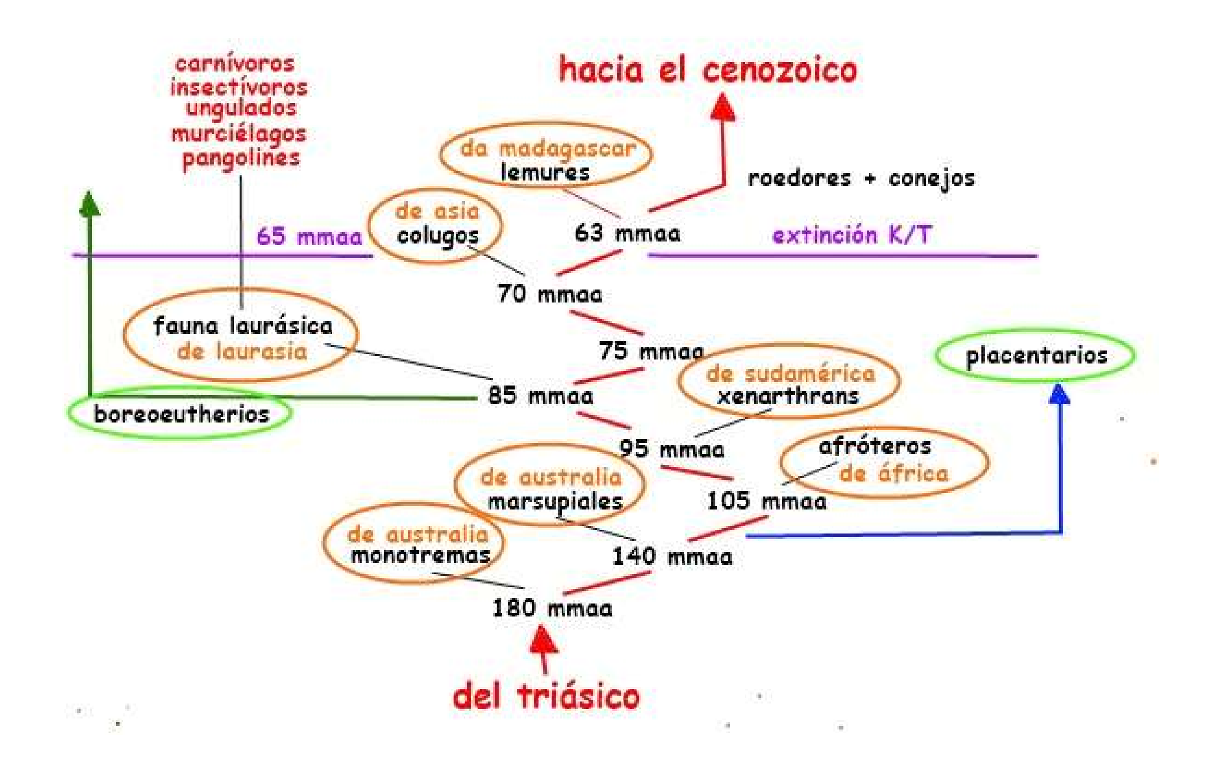
La segura adquisición de más información en el futuro nos permitirá saber cuándo se inició realmente la rama de los placentarios; en este libro seguiremos con la mayoría de biólogos que apoyan la datación más temprana del suceso. Dicho esto, avancemos un poco más en la evolución de los placentarios.

A pesar de que el hecho se inicia en el Cretácico, su esplendor de variación y riqueza morfológica se dará a partir de la nueva y próxima era Cenozoica. No obstante, presentamos ahora un esquema de las tres grandes familias evolutivas que en esos momentos ya se estaban diversificando, cada una con sus propios patrones según la particular zona geográfica en que se estaban produciendo sus radiaciones.

Patrón geográfico

Hace 105 millones de años África ya se había independizado, y quedó totalmente aislada de otros territorios hasta hace 40 millones de años. Sobre ella comenzaba a evolucionar una fauna muy particular de mamíferos placentarios: los **Afrotheria**. Mucho más tarde, y tras atravesar la crisis del Cretácico/Terciario, experimentarán una importante diversificación, ya que como veremos en el capítulo dedicada al Paleoceno, este superorden

incluye animales tan dispares como el topo dorado, el elefante o los manaties. El ancestro común de todos ellos, que apareció en el Cretácico, debió ser un pequeño habitante de los bosques, insectívoro o posiblemente herbívoro.



Edad de las radiaciones de los mamíferos durante el Cretácico y su distribución geográfica sobre los territorios de Pangea haciendo referencia a la toponimia actual (basado en la opinión de Richard Dawkins, "The ancestor's tale", 2004). Nuevos descubrimientos (2007) adelantan la fecha de irradiación de los marsupiales a un momento anterior a los 160 millones de años

Por su parte Sudamérica también quedó aislada, generando su propia fauna. Se cree que hace 95 millones de años un pequeño mamífero placentario con forma de musaraña inició el camino de los **Xenarthra**, los de las "*articulaciones raras*", nombre que alude a que las articulaciones de las vértebras lumbares son diferentes a las de cualquier otro mamífero. También tuvieron que atravesar la crisis del Cretácico/Terciario, pero luego a partir de esta frontera se irradió hacia especies tales como la de los osos hormigueros, armadillos y

perezosos, los cuales habitan exclusivamente en el continente sudamericano.

Y para terminar el patrón de distribución geográfica, hace 85 millones de años en Laurasia se estaba preparando un pequeño animal que más tarde daría lugar en este territorio fragmentado a nada menos que 2.000 especies de mamíferos placentarios, entre los que nos vamos a encontrar más tarde con la gran diversidad de los roedores, los carnívoros, insectívoros, ungulados, murciélagos e incluso los primates. Es la gran familia de los **Boreoeutheria**.

Pronto llegó la gran crisis.

La extinción Cretácico/Terciario, la última grande del Fanerozoico.

Hace 65 millones de años, al final de este acto, se produjo la extinción de diferentes especies que habían dominado la vida de mares y continentes. La segunda más cruenta en la historia del Fanerozoico.

Se desvanecen las huellas de los dinosaurios…

En el mar, desaparecieron los ammonites y una gran cantidad de plancton… La vegetación, especialmente en Norteamérica, sufrió un drástico cambio. Allí desaparecieron los bosques que existían antes del suceso y tras la catástrofe las tierras fueron colonizadas por una espesa cobertura de helechos… Dantesco horror y destrucción… "El mal vino de fuera"…

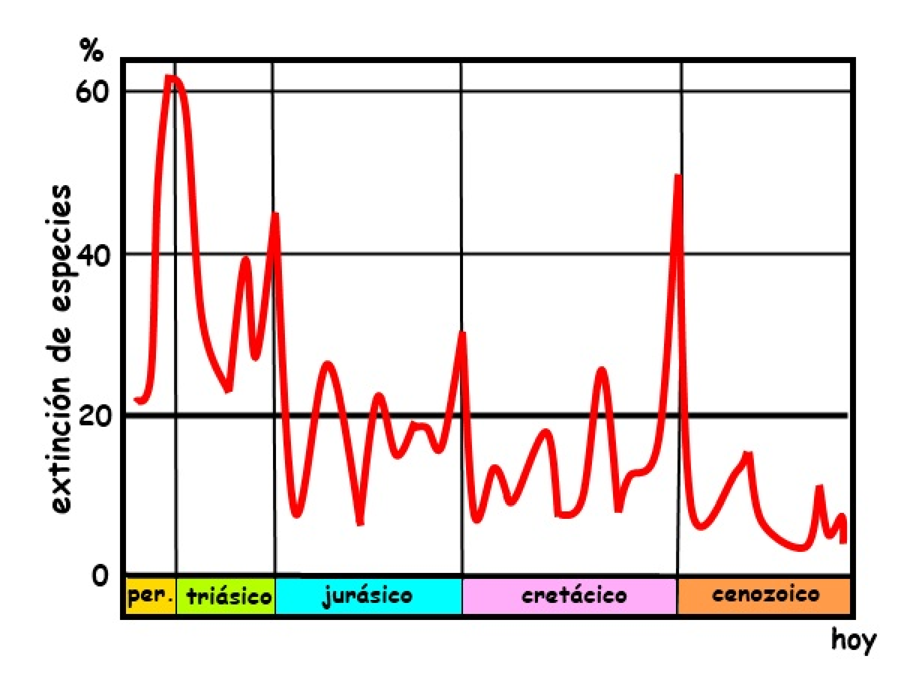
Dejo en el aire el hilo de la historia con la promesa de desvelar el desenlace. Y como en las antiguas fotonovelas, concluyo, pues, con un… **continuará**.

NOTAS DEL CAPÍTULO 45:

1. "*The origin and early evolution of metatherian mammals: the Cretaceous record*", Thomas E. Williamson et al., publicado en la revista ZooKeys de diciembre de 2014.
2. "*A Jurassic eutherian mammal and divergence of marsupials and placentals*", Zhe-Xi Luo et al. Publicado en Nature de agosto de 2011.
3. En este artículo encontraréis la información de detalle sobre *Sinodelphys szalyi:* "*An Early Cretaceous Tribosphenic Mammal and Metatherian Evolution*", Zhe-Xi Luo et al. (diciembre 2003).
4. "*New marsupial (Mammalia) from the Eocene of Antarctica, and the origins and affinities of the Microbiotheria*", F. J. Goin et al. Lo encontraréis en la Revista de la Asociación Geológica Argentina de oct/dic 2007.
5. Al respecto, ver el artículo "*Los ancestros de los canguros australianos modernos eran sudamericanos*" de la web del Servicio de Información y Noticias Científicas (SINC), de julio de 2010.
6. "*The Placental Mammal Ancestor and the Post–K-Pg Radiation of Placentals*", Maureen A. O'Leary et al. Publicado en la revista Science de febrero de 2013.

46. La crisis del Cretácico/Terciario

El final del capítulo anterior apuntaba a un desenlace no previsto. Allí dejamos unos puntos suspensivos y un **continuará**… que retomamos en este momento para hablar de una crisis realmente importante, el episodio de extinción de vida en la historia de la Tierra que ocupa el segundo lugar en la lista de los más graves. Ahora recogemos el testigo perdido. Para nosotros, los *Homo*, esta extinción tiene una especial importancia, ya que allí se inició el camino que llega hasta nosotros.



Sí, realmente fue un acontecimiento extremo, o bien un cúmulo de acontecimientos lo que nos llevó a lo que llamamos extinción del Cretácico/Terciario, extinción K/T o extinción K/Pg haciendo honor a la mayor ortodoxia geológica que introduce el uso de Paleógeno (Pg) sobre el clásico Terciario (T).

Haremos un viaje panorámico sobre los resultados antes de intentar analizar los motivos. Hay que decir ante todo que el conocimiento sobre el desarrollo de esta crisis está en continua discusión. Es poca la diversidad geográfica de los datos fósiles conocidos, basados en su gran mayoría en lo que se sabe sobre la fauna y flora de lo que en aquel entonces era la actual Norteamérica.

Se han realizado multitud de estudios y aunque los datos, como se ha comentado, son geográficamente muy parciales, no se denota un rechazo frontal a la posible generalización global de sus resultados.

Dichos trabajos concluyen en la realidad de una gran extinción en la frontera del Cretácico con el Terciario, aunque discrepan en el ritmo con que pudo acontecer. Los resultados fueron terribles: un 50% de los clados vertebrados, marinos o terrestres, desaparecieron. Recordad que un clado es una familia completa de especies con un antecesor único común. Aunque en realidad el mal se repartió de distinta manera según los barrios. Los reptiles con escamas como lagartos y serpientes, los marsupiales y los elasmobránquios, es decir, tiburones y afines, prácticamente desaparecieron. Los dinosaurios tuvieron aún menos suerte: se extinguieron para nunca más volver. Sin embargo, nuestros antepasados placentarios, así como otros reptiles -las tortugas o los cocodrilos-, los anfibios y los peces teleósteos, tuvieron un mejor perfil de supervivencia. Las aves menguaron sus filas, pero lograron atravesar la crisis. Quedaron algunos neornithes para refundar la clase, cosa que hicieron de forma espectacular durante el Terciario. Del mar desaparecieron los ammonites, un cefalópodo con pinta de caracol de concha plana -fósil icónico para muchos de nosotros- y una gran mayoría de bivalvos como los rudistas, que ya conocimos en otro capítulo participando en la formación de arrecifes. El nanoplancton calcáreo y los foraminíferos planctónicos experimentaron una gran reducción de sus especies. Recordad que la biota del plancton suele vivir principalmente en las primeras capas más superficiales del mar. Sin embargo, los foraminíferos bentónicos, de los fondos, sobrevivieron perfectamente a pesar de sufrir bastantes cambios morfológicos.

Más adelante entenderemos el porqué de tan distintos efectos en animales tan parecidos: intuimos que la profundidad de su hábitat marino debió ser trascendental.

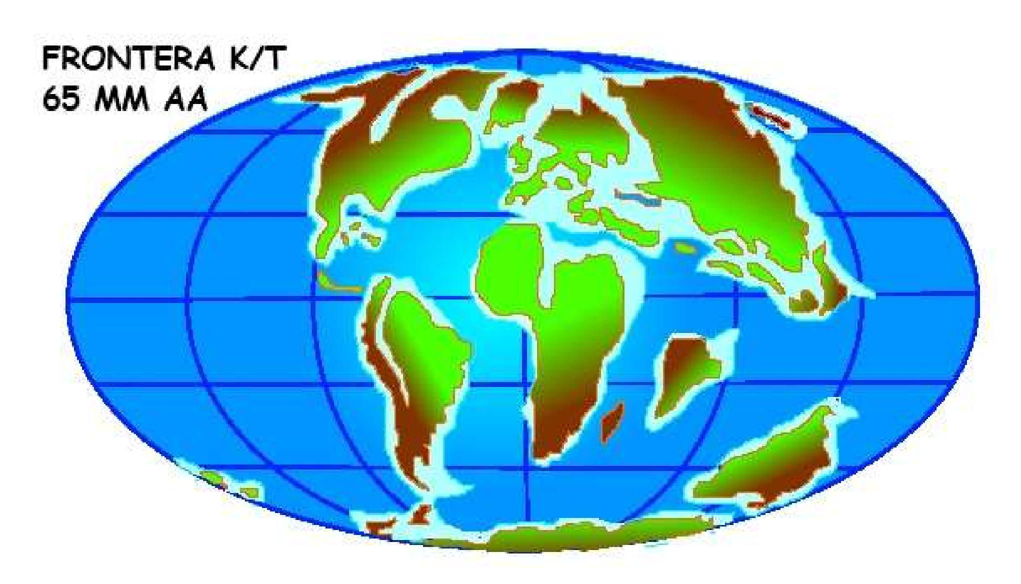
En las plantas fue también grave, ya que desapareció en el registro fósil casi el 60% de la megaflora -hojas, frutos, ramas, raíces…- aunque al seguir la traza de los pólenes fósiles el porcentaje se reduce casi a la mitad. El daño quedó también repartido según su localización geográfica, ya que fue mayor en las latitudes bajas e intermedias. En el mar fue peor, pues casi desaparecieron las plantas al completo debido posiblemente a un exceso de contaminación orgánica resultado de la gran mortandad producida. Aunque esta polución no fue tan mala para algunos, como explicaré un poco más abajo.

A partir de los datos estudiados se ha podido extraer un esquema general: en esta extinción tenías muchas armas para combatirla si eras un animal pequeño, acuático, de sangre fría y no amniótico, en contraposición con los que penaban a través de posiciones más débiles al ser grandes, terrestres, de sangre caliente y amnióticos. Tras una primera mirada nos sorprende que esta compartimentación no case completamente bien con la exitosa historia de supervivencia de los placentarios. Paciencia. Más tarde veremos cuáles fueron las fortalezas particulares que contrarrestarían sus debilidades.

En fin, éste fue el núcleo de la crisis biológica de hace 65 millones de años. Son datos comprobados. Pero, ¿por qué sucedió? ¿Cuáles fueron las particulares circunstancias del momento? Las condiciones de contorno medioambiental tuvieron que ser cruciales, en especial en los ámbitos de la geología y la atmósfera. Vamos a por ello.

En la época que nos movemos, el Cretácico tardío, los continentes “flotaban” muy desmembrados y aislados unos de otros, como puede verse en el mapa de más abajo. Entre ellos el agua dibujaba mares someros en donde la vida prosperaba. Como dijimos en un capítulo anterior, se estaba viviendo un momento climático excelente, cálido

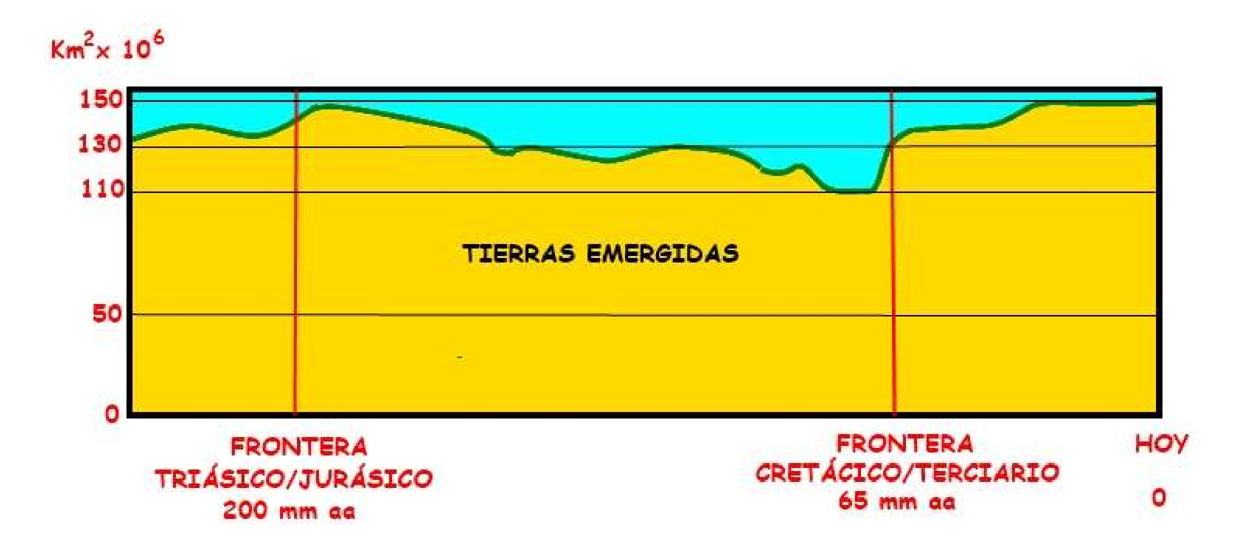
y húmedo, con una distribución de temperaturas muy uniforme a lo largo y ancho del globo. No obstante, desde mediados del Cretácico se había iniciado una senda de enfriamiento que se estima pudo ser de unos 3 grados en la frontera con el Terciario.



El esquema geográfico de la figura anterior no iba a durar mucho, ya que se piensa que en aquellos últimos años del Cretácico, e inicios del Paleógeno, la actividad magmática de las dorsales oceánicas que hasta entonces había sido muy intensa, redujo su dinámica. El resultado de esta descompresión en la base de las dorsales se concretó en el hundimiento de sus estructuras, que cayeron a cotas más profundas, dando su volumen a las aguas. La consecuencia obvia es que descendió el nivel superficial de ésas. Se estima que entre 150 y 200 metros, haciéndose muy evidente en las zonas de mares poco profundos. Un nuevo mundo iba apareciendo del fondo de las aguas, de forma que se cree que en el momento de mayor regresión se habrían añadido a las tierras secas una superficie equivalente a la del actual continente africano.

Imaginad. Las llanuras costeras en donde florecía la vida animal se iban quedando cada vez más alejadas de las aguas. Las tierras que iban emergiendo no tenían nada que ver con la amplia franja costera anterior. No eran llanas ni extensas. Quedaban fragmentadas y rodeadas de fondos marinos abruptos. Un paisaje de lagunas salinas

de interior y archipiélagos aislados *pixelaban* el panorama. A medida que las aguas se retiraban las marismas costeras iban perdiendo importancia, mientras que los ríos se hicieron más largos al tener que verter sus aguas hasta puntos de un mar cada año más lejano. Era evidente el tremendo cambio de los nichos en donde estaban acostumbrados a vivir y alimentarse algunos de los animales de entonces, en particular los dinosaurios.



Perfil de las regresiones marinas en los últimos millones de años. Hoy en día la superficie de tierras secas supone el 29% del total del planeta. A inicios de la regresión del Cretácico era tan sólo del 21%.

El anterior esquema de regresión marina vivía en paralelo con un viejo proceso. La disminución de la actividad volcánica en las profundidades marinas que habíamos comentado antes no se había visto emparejada con lo que sucedía en algunos lugares de la superficie terrestre. El subcontinente indio "navegaba" solitario y a la deriva por zonas tropicales. En la región central oeste hacía años que se estaba produciendo lo que se conoce como los Traps del Decán, un fenómeno volcánico semejante al de las "*Siberian trapps*" de la crisis del Pérmico/Triásico. Se había iniciado hace 69 millones de años y continuaría de forma intermitente hasta hace 63 millones de años. Un periodo en el que queda comprendido el momento de la extinción K/T, cuando precisamente se produjo un pico de emisión.

Hoy el lugar se le conoce como la meseta del Deccan, y sobre ella se asienta un volumen de basaltos que se estima superior a los dos millones de kilómetros cúbicos sobre una superficie de también dos millones de kilómetros cuadrados. Sí, sí. Habéis calculado bien: eso es una capa de mil metros de lava en promedio. Incluso hay zonas donde el espesor es de dos kilómetros y medio.



Vista de las Traps del Decán en las colinas Western Ghat al este de Mumbai, India (Wikimedia, CC BY-SA 2.5 Generic)

Este intermitente "humeo" a lo largo de tantos años produciría sin lugar a dudas un incremento de las partículas atmosféricas en suspensión, que se irían depositando o acumulándose en el aire siguiendo el ritmo de la actividad volcánica en el antiguo Decán. Este mismo ritmo sería el que marcaría el perfil de concentraciones de CO_2. El mundo se encontró durante mucho tiempo peleando entre los vaivenes en el contraste del enfriamiento provocado por la reflexión de la luz solar en la capa de polvo y el calentamiento consecuencia del incremento de efecto invernadero provocado por el dióxido de carbono.

Fuera cual fuera el juego en cada momento de ambas circunstancias antagónicas, ya sabemos que desde mediados del Cretácico las temperaturas estaban decreciendo, no mucho, pero siguiendo una clara senda descendente. Es fácil imaginar que fueran tiempos revueltos durante los que el planeta y todo lo que sobre él se encontraba se vieran sometidos a un persistente y a veces sutil test de estrés, que seguramente se confabulaba con las consecuencias de la transformación y pérdida de los nichos tradicionales durante el proceso de regresión marina.

Hay diversidad de opiniones, y podemos asegurar que el tema no está muy claro. Pero hay un grupo de biólogos capitaneados por el norteamericano J. David Archibald que son capaces de observar en los datos una clara regresión en la diversidad de los dinosaurios a lo largo de los diez últimos millones de años del Cretácico, durante los cuales este superorden habría disminuido su diversidad taxonómica entre un 30 y un 50%. Es curioso que sus especies carnívoras resistieran mejor que las herbívoras el agotamiento de diversidad.

Bien es verdad que los estudios realizados se ocupan básicamente del espacio del antiguo territorio norteamericano, que en aquellos momentos estaba cruzado de norte a sur por un extenso mar interior en franca regresión. Los dinosaurios medraban en grandes manadas, parecidas a las de los actuales ungulados sobre la sabana africana, sobre las llanuras próximas al mar interior. Allí tenían los herbívoros fácil su subsistencia. Como se podía esperar, eran seguidos por los carnívoros dinosaurios terópodos, que gracias a la depredación sobre los anteriores también tenían una fácil subsistencia. La regresión de los mares iba alejando a estos placenteros lugares de lo que habían sido sus enclaves óptimos durante muchos años. Junto a la nueva quebrada línea de mar, la tierra recién emergida no favorecía el nuevo desarrollo de aquel tipo de nicho de alimentación. Quizás las tenues nubes de polvo del Decán habían también estresado la función fotosintética de las plantas. Lo cierto es que el resultado de todo lo anterior es el que conocemos. No pudo ser de otra manera. Con la pérdida de las zonas donde tenían su despensa, los animales

herbívoros empiezan a decaer, siguiéndoles con posterioridad los carnívoros que se alimentaban de ellos.

¿Hubiera cambiado significativamente el mundo si algo más no hubiera alterado esta progresiva senda de tensión sobre las cadenas biológicas? Quién sabe. Posiblemente hoy aún se pasearía por las llanuras centrales norteamericanas, o junto a las planicies del curso bajo del río Guangdong en China, o por la Patagonia argentina, algún descendiente de los dinosaurios. Y si ésta hubiera sido la hipótesis, nosotros, lector y escritor, no estaríamos ahora aquí contemplando estas letras.

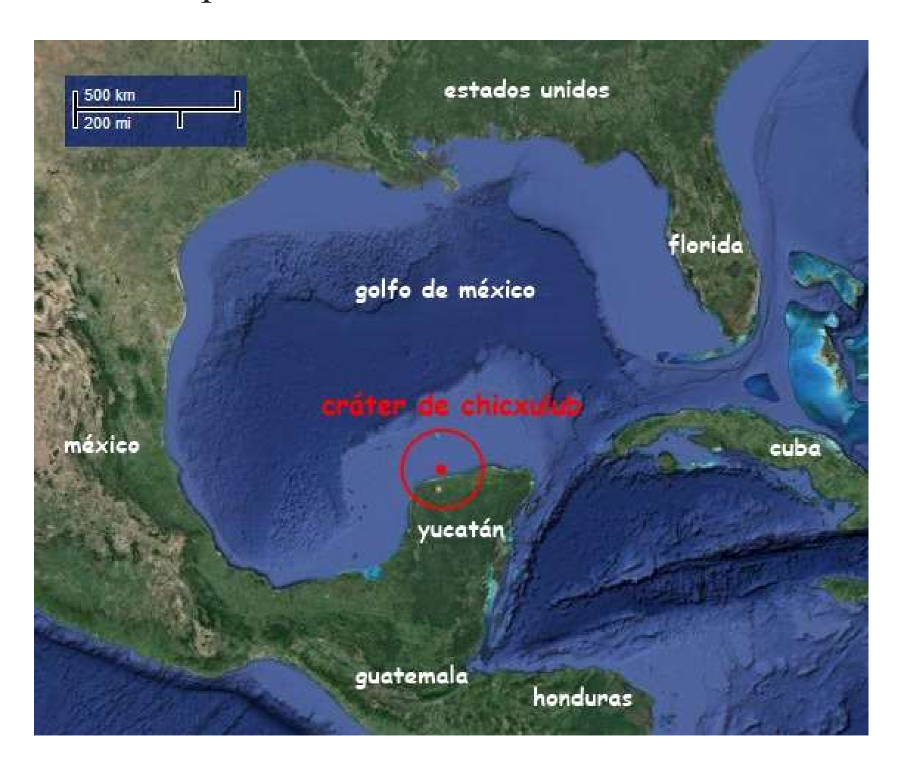
Pero no fue así. El curso de la vida que a finales del Cretácico discurría como siempre, acorralado entre sus estreses y sus oportunidades, se vio súbitamente alterado. Pero no diremos aún el porqué.

Antes vayamos de la mano del investigador norteamericano y futuro premio Nobel Luis Walter Álvarez. En 1980 descubrió que, mezclado en el fino estrato geológico intermedio que separa el período Cretácico del Terciario, datado en hace 65 millones de años, había una concentración de iridio mucho mayor de lo que es habitual en la corteza de nuestro planeta. Además el fenómeno se repetía en muy diversos y alejados emplazamientos de la Tierra, es prácticamente un fenómeno global. Tras una larga historia de controversias, que podéis seguir de forma amena en el libro "*El enigma de los dinosaurios*" del periodista norteamericano John N. Wilford, la comunidad científica mundial acepto la tesis de Álvarez: el iridio provenía de un bólido exterior que habría impactado en nuestro planeta hace 65 millones de años.

El iridio es un trazador fiable de presencia de meteoritos, ya que los niveles de este metal de transición son generalmente más altos en aerolitos y otros objetos extraterrestres. En la Tierra, durante sus calientes inicios, se vio arrastrado por el hierro hasta posiciones próximas al núcleo, por lo que cuando nos lo encontramos en altas

concentraciones en la corteza terrestre inmediatamente pensamos en que probablemente viene de un meteorito… por lo que el alto porcentaje de iridio en el estrato K/T se interpretó definitivamente como el resultado de la colisión de un gran asteroide que en aquella época habría caído sobre la Tierra.

Mediante la extrapolación de la cantidad de iridio que se encuentra en esta capa geológica frontera se llegó a la conclusión de que se debía de tratar de un asteroide con un tamaño aproximado a los 10 kilómetros de diámetro. La cuestión que quedaba sobre la mesa era que había que encontrar el cráter del impacto para asegurar la exactitud de esta hipótesis.



Localización del cráter de Chicxulub en la península del Yucatán, México (a partir de Google maps)

Uno de los mayores problemas de la resolución del nudo era que en aquel momento no se sabía de algún cráter cuyas dimensiones correspondieran al tamaño calculado, que debería tener entre 150 y 200 kilómetros de diámetro. Al final se hallaron evidencias de uno, con un diámetro de unos 180 kilómetros, en la península de

Yucatán junto a un reposado pueblo de pecadores llamado Puerto Chicxulub. El estudio del cráter parece indicar que el bólido entró con una inclinación de unos 45º y en dirección noroeste.

Lo que viene a continuación es un pequeño compendio de ***lo que se dice*** que pudieron ser las consecuencias del impacto. Habría causado algunos de los mayores tsunamis de la historia de la Tierra. Una nube de polvo, cenizas y vapor habrían extendido el diámetro y área del cráter cuando el meteorito se hundió en la corteza terrestre en menos de un segundo. El material excavado, junto con trozos del asteroide, habrían sido eyectados a la atmósfera por la explosión y se habrían calentado hasta convertirse en cuerpos incandescentes que habrían reentrado en la propia atmósfera terrestre, quemándola y posiblemente provocando incendios globales. Mientras tanto, enormes ondas de choque habrían causado terremotos y erupciones volcánicas globales. La emisión de polvo y partículas podrían haber cubierto la superficie entera de la Tierra durante varios años, posiblemente una década, creando unas condiciones de vida muy difíciles para los seres vivos. La producción de dióxido de carbono provocada por el choque y por la destrucción de rocas carbonatadas habría causado un dramático efecto invernadero. Otra terrible consecuencia del impacto la produjeron las partículas de polvo de la atmósfera, las cuales habrían impedido que la luz solar llegara a la superficie de la Tierra disminuyendo drásticamente la temperatura. La fotosíntesis de las plantas habría quedado así interrumpida, afectando a la totalidad de la red trófica.

Si atendemos a la lista presentada por el paleontólogo británico Michael Benton en 1990, allí podremos leer hasta 66 causas de la extinción de los dinosaurios, algunas tan "ocurrentes" como "decrepitud cerebral seguida del consiguiente estado de estupidez" (sic).[1] Sin embargo aunque eso es ***lo que se dice***, no todo ello es ***lo que se cree*** que pasó. Y ***lo que se cree*** que pasó es aquello que resulta apoyado por un manojo de evidencias más o menos importantes o plausibles.

Que nos llevan de la mano hasta una corta tipología de causas, aquellas que merecen mayor consenso o respeto entre los expertos.

Empecemos echando un vistazo al famoso estrato de transición en el que ya sabemos que el contenido de iridio es sospechosamente alto. En esta misma capa, y con una distribución prácticamente global a lo largo del planeta, se encuentran una serie de microesférulas, las tectitas. Estas microesférulas fueron producidas tras la reentrada en la atmósfera terrestre de todo aquel material que fue fundido en el impacto y lanzado cual cohete balístico a trayectorias suborbitales. Son el resto de un gigantesco y global castillo de fuegos artificiales producido durante la reentrada del material eyectado en la atmósfera, momento en que se fracturaba y alcanzaba la incandescencia, condensándose en pequeñas esferas que emitirían durante unas pocas horas y desde cualquier punto del cielo un tremendo flujo de energía infrarroja.



Una tectita que presenta una cavidad resultante de una burbuja de gas. Microesferas de este material vítreo iluminaron el cielo durante los inicios de la crisis K/T (Wikimedia, GFDL 1.2)

La energía asociada a este pulso infrarrojo se ha estimado a partir de la cantidad de esférulas que se encuentran en el estrato K/T y de consideraciones cinéticas en sus trayectorias de entrada. Y los resultados dicen que en aquel momento en la atmósfera, a unos 70 kilómetros de altura, se estaba movilizando una energía del orden de

los 10^8 J/m^2 -¡mil millones de veces la energía de una de las bombas atómicas que los Estados Unidos de Norteamérica arrojó sobre Japón!-, lo que calentó las capas de la atmósfera a esta altura hasta una temperatura del entorno de los 1.000K. Y esto durante el corto intervalo de las primeras horas tras el impacto. A la vista de lo cual me atrevo a decir: ¿qué importa lo que viniera después?

Cualquier atisbo de vida que quedara expuesto a la tremenda radiación acabaría incinerado. Sólo sobrevivió aquel que pudo ocultarse. Bastaba una protección de tan sólo diez centímetros de tierra o rocas sobre tu cabeza o estar sumergido bajo agua cuya capa más superficial disipaba por evaporación la terrible energía radiante de aquel radiador que a 70 kilómetros de altura se puso a 1.000K ¿Entendemos ahora el porqué del mayor éxito de los foraminíferos bentónicos sobre los planctónicos? ¿Entendemos el éxito de los pequeños animales terrestres como los placentarios?



Vista del estrato límite Cretácico-Terciario: Capa Negra de Caravaca (Foto: Antonio del Ramo, fair use)

La biosfera vegetal terrestre lógicamente no podía aprovecharse de estas protecciones. Por lo que hay que pensar que se iniciaría casi a la vez la combustión de una buena parte de esta masa a lo largo de toda la extensión del planeta, incendios que durarían días y que llenaron de hollín la atmósfera, en donde se uniría al ya generado durante el impacto que quemó los abundantes hidrocarburos subterráneos de la zona. Hollín que quedó también almacenado prácticamente a lo largo de toda la capa de transición K/T en proporciones muy elevadas. En este estrato se concentra una cantidad equivalente a como si se hubiera quemado el 10% de la biomasa vegetal actual.

Tras las pocas horas radiantes del pulso de radiación infrarroja, el humo y el hollín de los incendios, unidos al polvo residual levantado tras el impacto físico del meteorito, inducirían una época de oscuridad. La función fotosintética se ralentizó dando una explicación adicional a la importante extinción de la megaflora que pudiera haber escapado de la quema. El descenso temporal de la temperatura, consecuencia de la crisis de luz solar, tampoco favorecía una rápida recuperación. En los mares se notó poco esta crisis gracias a su gran capacidad de absorción térmica, pero en tierra se cree que se vivieron entre dos y seis meses de temperaturas congeladoras. De todas formas el frío no debió ser un actor muy condicionante, ya que sabemos que muchos animales de sangre fría lograron sobrevivir con éxito. Tortugas, cocodrilos y anfibios se encargaron de atestiguarlo. Por no hablar de la supervivencia de las abejas tropicales que precisan de una buena temperatura (en el entorno de los 30 grados) para vivir ellas y las flores de las que se alimentan.

Los animales herbívoros perdieron sus fuentes de alimentación. Los carnívoros, detrás de aquellos, perdieron también sus fuentes de alimentación. El mundo se llenaría de residuos, de cadáveres animales y vegetales. Una magnífica oportunidad para los detritívoros y saprofitas, incluyendo plantas y hongos, o para aquellos que aceptaban una dieta variada sin hacer ascos a la carroña.

De ahí que algunos insectos lo tuvieran fácil. De aquí también que algunos animales insectívoros lo tuvieran fácil. En el mar tenemos un buen ejemplo de lo que contamos. Los animales sobrevivieron con más facilidad, al estar protegida la vida por el agua, pero sobrevivieron mejor aquellos animales cuya alimentación estaba basada en la cadena de detritos en comparación con los que dependían de la producción primaria de nutrientes -los dependientes de las plantas vivas-. El fondo marino siempre ha sido el depósito general con un aporte especial en estos momentos que caía desde la superficie como una abundante lluvia fina. Y realmente se ha podido constatar que fue un buen momento para los detritívoros de estos lugares. De nuevo comprendemos mejor el éxito de los foraminíferos bentónicos.

¿Lluvia ácida? ¿Terremotos? ¿Tsunamis? Evidentemente que allí estuvieron, pero tuvieron efectos muy menores. La lluvia ácida que afecta en gran medida a los ecosistemas acuáticos debió tener muy pocas consecuencias: ya dijimos más arriba que si eras un animal de agua dulce tenías muchas ventajas en aquellos pocos años infernales. En cuanto a terremotos y maremotos, evidentemente no fueron motivo de extinciones globales, aunque obviamente donde alcanzaran sus martillos el daño debió ser tremendo. En cualquier caso fueron comparsas, como la influencia de las *Deccan trapps* o de la regresión marina, durante el proceso de extinción masiva.

Estamos llegando al final. Y es el momento de reproducir unas frases del inicio del capítulo:

"En esta extinción tenías muchas armas para combatirla si eras un animal pequeño, acuático, de sangre fría y no amniótico, en contraposición a los que ostentaban posiciones más débiles al ser grandes, terrestres, de sangre caliente y amniótico. Tras una primera mirada nos sorprende que esta compartimentación no case completamente bien con la exitosa historia de supervivencia de los placentarios".

Ahora podemos entender mejor estas frases. Un animal pequeño pudo esconderse mejor en su madriguera o bajo una roca. Un animal acuático se vio mejor protegido por la columna de agua sobre sus cuerpos. Un no-amniota era más fácil que tuviera sus pequeños huevos bajo protección en tierra o bajo el agua. Con respecto a la sangre fría creo que su aparente ventaja procede de motivos puramente circunstanciales del momento, a pesar de que *per se* contaban con muchos de los números en la mortal lotería. Los que más suerte tuvieron les llegó porque pudieron protegerse bajo agua o tierra. Además, no hay que olvidar que entre los animales ectotérmicos abundan los del tipo insectívoro o detritívoro.



Esto es una musaraña actual. Es opinión bastante generalizada entre los biólogos que algunos de los mamíferos que sobrevivieron a la extinción debían ser muy parecidos a este animal (Wikimedia, dominio público)

¿Y qué hay de los mamíferos? No todos tuvieron la misma suerte, ya que en la catástrofe desparecieron el 85% de los marsupiales,[2] hoy en día con una pequeña población confinada en Australasia y Sudamérica. Y podemos suponer que algo parecido les pasó a los monotremas, aún más escasos. Por contra, los placentarios se llevaron el premio. Sin lugar a dudas les salvó su pequeño tamaño,

gracias al que pudieron encontrar mil guaridas donde esconderse rápidamente. Les salvaron sus habilidades para vivir de múltiples recursos alimentarios, entre los que se encontraban insectos y carroña. Les salvó el "descaro" vital que proporcionaba su metabolismo "turbo" a sus pequeños organismos. El oportunismo que les había permitido sobrevivir con éxito en un mundo dominado primero por los cocodriloformes y luego por los dinosaurios fue lo que les salvó en los momentos apurados del tránsito al Terciario. Como muchos otros supervivientes, estas habilidades les permitieron ser los primeros en aprovechar los nichos vacíos que dejaron los dinosaurios al desaparecer de la faz de la Tierra. Y tras 65 millones de años de desarrollar su cadena evolutiva, conseguir que uno de los suyos, un bípedo hirsuto, inteligente e insaciable, impusiera su voluntad sobre casi todo lo que había surgido hasta entonces. No nos emocionemos: Gaia tiene siempre la última palabra.

Tras este gran desastre de la extinción K/T se acaba el Mesozoico. La Tierra necesitó aún unos 300.000 años para estabilizar de nuevo su clima. La época cálida y húmeda que empezó cuando la ruptura de Pangea, y que se mantuvo unos 150 millones de años más a lo largo de toda la era de "*Vida intermedia*", se prolongaría aún en el tiempo adentrándose en el inicio del Cenozoico.

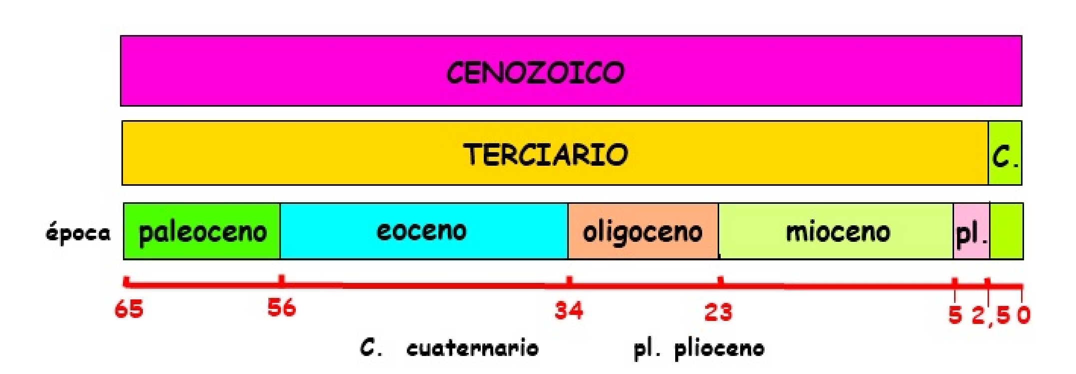
Poco después el paraíso climático iba a sufrir una profunda transformación en pocos millones de años. Lo iremos viendo en los próximos capítulos, comenzando en el siguiente por la habitual panorámica de geología, climatología, geografía y atmósfera de una nueva era. Nos veremos pues en la "*nueva vida*", que es lo que significa Cenozoico.

NOTAS DEL CAPÍTULO 46:

1. Si tenéis más curiosidad al respecto podéis ir a Evolutionary Biology 24, 371-400. "*Scientific methodologies in collision. The history of the study of the extinction of the dinosaurs*", Michael J. Benton (1990).
2. Según este estudio de la revista ZooKeys de diciembre de 2014, "*The origin and early evolution of metatherian mammals: the Cretaceous record*", Thomas E. Williamson et al., sobre la evolución temprana de los mamíferos.

47. Comienza el Terciario

A partir de este capítulo vamos a dar un salto cualitativo que hace que parezca que nos adentremos en un nuevo mundo, más actual, más próximo al que conocemos. El anterior nos sirvió como colofón a épocas ancestrales: El Mesozoico, que había durado 186 millones de años, lleno de extraños reptiles, ubicuos dinosaurios, megaorganismos y mamíferos casi desaparecidos del mapa, algo así como el Parque Jurásico de Spielberg. A partir de ahora encaramos la última recta de la evolución. Nos quedan tan sólo los 65 millones de años del Cenozoico. Estructuraremos el viaje compartimentándolo de acuerdo a las épocas en que geológicamente se le divide, aunque en el presente capítulo inicial haremos un repaso general de todo el periodo, contemplando su geografía, geología y clima.

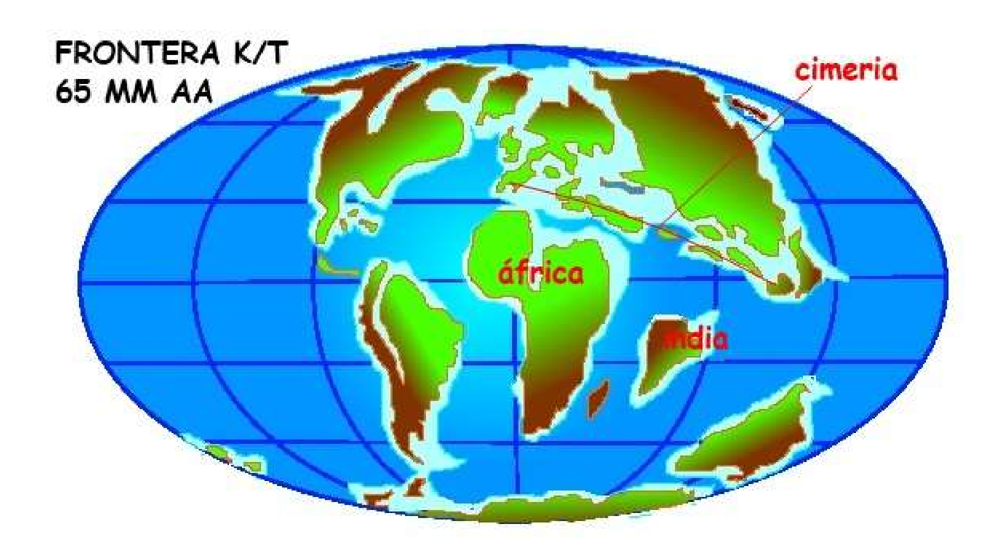


Sí. Por delante nos esperan los últimos 65 millones de años de nuestra querida Tierra, durante los que nosotros, los mamíferos, radiamos toda la inmensa diversidad de nuestras especies. Desde nuestro mezquino punto de vista antropocéntrico nos hemos atrevido a bautizar a estos años como *la era de los mamíferos*. Aunque también podríamos haberla llamado la edad de los peces teleósteos. El 96% de los peces actuales conocidos son teleósteos, y muchos

radiaron también en esta era. O el de las aves carnívoras que durante 20 millones de años se situaron a la cabeza de los depredadores. Pero no nos va a temblar el pulso: ¡las muchimillonarias en número bacterias, sus primas las arqueas, los desconocidos hongos, protistas en general, artrópodos, peces, anfibios, reptiles y aves, todos tuvieron sus momentos de gloria! ¡Ahora nos toca a nosotros, los mamíferos!

¡¡Qué comience el último acto!!

Aparece en escena el Cenozoico, llamado así a partir del griego *καινός/kainos*, “nuevo” y *ζωή/zoe*, “animal o vida”, que de forma altamente explícita quiere decir: era de los “animales nuevos”. Esta era está dividida en dos periodos: el Terciario, que dura casi toda su extensión, y el Cuaternario que abarca los últimos 2,5 millones de años.



La geología y geografía

Por entonces la Tierra presentaba una disposición continental semejante a la de hoy en día, con un inicio de territorios desmembrados, grandes masas de tierras aisladas que se movían bajo la batuta de las fuerzas tectónicas. A lo largo de todo el periodo anterior, el Mesozoico, las rocas y montañas formadas en las anteriores orogenias, sobre todo en la carbonífera Herciniana, se

habían ido erosionando y roturando, formando grandes sedimentos que ya antes del comienzo del Cenozoico comenzaron a ser de nuevo reciclados y reactivados. Sus materiales se vieron deformados, fracturados y metamorfizados, borrando las huellas procedentes de orogenias más antiguas y dándoles un nuevo aspecto, base del que contemplamos hoy en día. La presión que se ejerció por el choque de las placas africana, del subcontinente indio y la pequeña cimmeriana -en la que se encontraba la microplaca ibérica- sobre la masa continental de Eurasia provocó lo que llamamos el *ciclo orogénico Alpino.* Algunos lo inician ya en la época de sedimentación y reciclado del Mesozoico y otros emparejan su comienzo con el del Cenozoico, cuando empieza la formación de las principales cadenas montañosas del sur de Europa y Asia desde el Atlas, junto al Atlántico, pasando por el Mediterráneo, Asia central y el Himalaya y terminando en las islas de Indonesia, en el más alejado océano Índico.

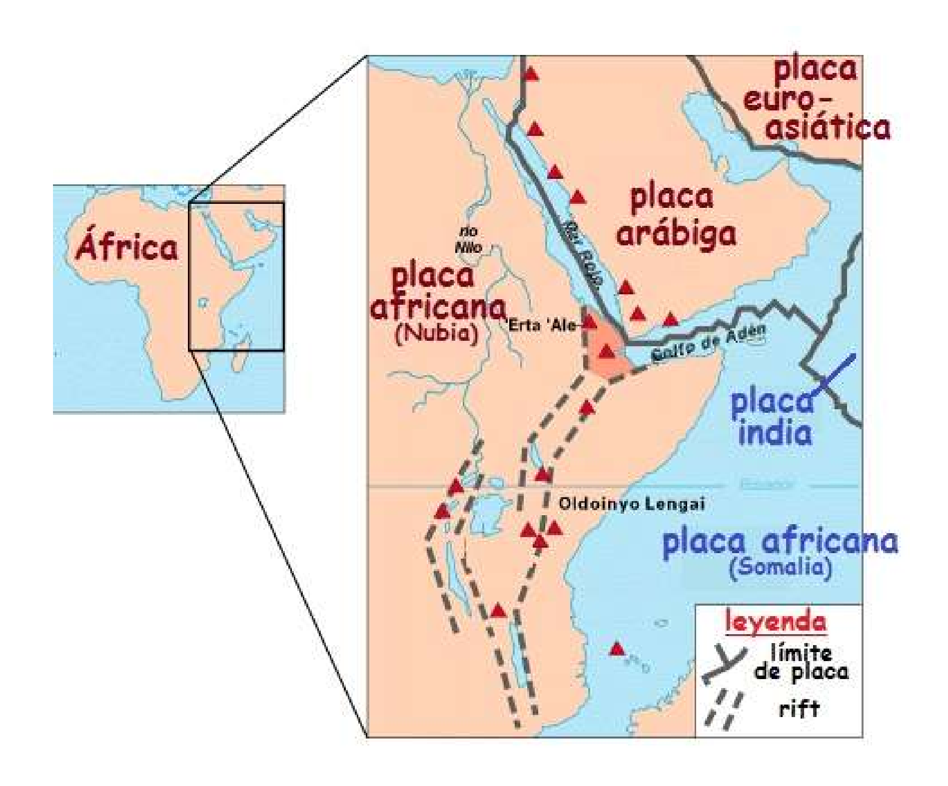


Extensión de la Orogenia Alpina (a partir de Wikimedia, dominio público)

Si vemos el mapa de inicio de este capítulo, datado hace 65 millones de años, podremos imaginar las derivas de los continentes. La India

comenzó a chocar con Asia hace cerca de 55 millones de años, iniciándose así la formación del Himalaya y la elevación de la meseta del Tibet hace entre 52 y 48 millones de años. La presión de la placa africana generó las montañas centrales propias de la orogenia alpina, que abarcan la formación entre otros de los Alpes y Cárpatos en Europa y el Atlas en el norte de África, y que se elevaron entre 37 y 24 millones de años atrás. Este proceso aún continúa a día de hoy.

Hace unos 35 millones de años Australia y la Antártida, que ya viajaban solas, se separaron, lo que fue el punto de partida para la formación del casquete helado sobre esta última al permitir la circulación de las corriente frías circumpolares, como explicaremos más tarde.



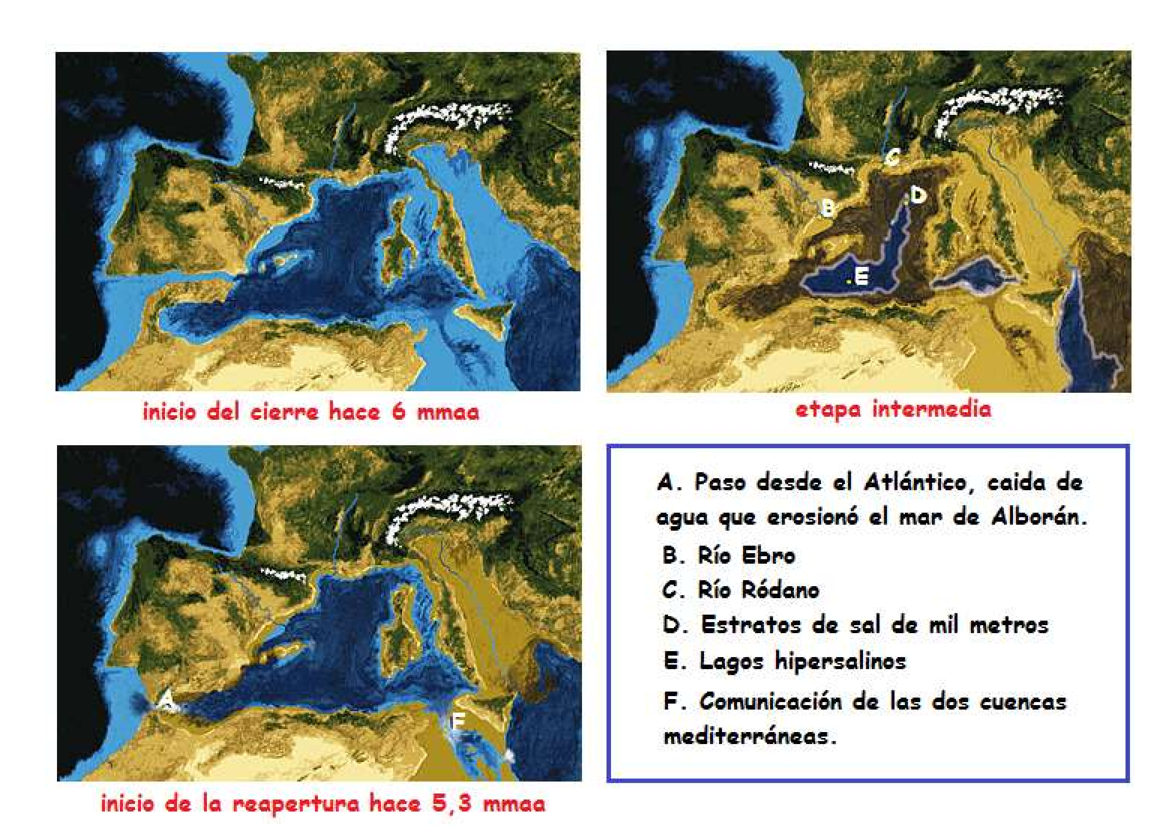
Apertura del Gran Valle del Rift africano (a partir de wikimedia, dominio público)

Por la misma época Arabia se estaba separando de la placa africana a través de un tremendo rift que iba desde el mar de Tetis al océano

Índico y que penetraba hasta el centro de África. El Gran Valle del Rift es una tremenda fractura geológica cuya extensión total es de unos 5.000 kilómetros en dirección norte-sur. Aunque generalmente se habla de este valle para referirse sólo a su parte africana, lo cierto es que el mar Rojo y el valle del río Jordán también forman parte de él, incluso el brazo lateral del Golfo de Adén. Comenzó a formarse en el sureste de África -donde es más ancho- hace unos 30 millones de años y sigue creciendo en la actualidad tanto en anchura como en longitud, expansión que con el tiempo se convertirá en una cuenca oceánica. De hecho ya lo es en la zona del mar Rojo gracias a su comunicación con el océano Índico.

En un principio la deriva de Arabia cerró el mar de Tetis por el este, conformando al que sería el futuro Mediterráneo. En el mismo movimiento de aproximación de África sobre Eurasia se fue paulatinamente estrechando Tetis, hasta que hace 6 millones de años quedó cerrado el "estrecho de Gibraltar" desecándose el Mediterráneo y formándose inmensos depósitos de sales. Es lo que se conoce como la crisis salina del Messiniense. Hay que imaginar el largo periodo mientras se iba cerrando el cada vez más estrecho brazo de agua, durante el cual la velocidad de desecación del mar interior fue superior al de reposición de agua desde el "estrecho de Gibraltar" o por su ríos interiores: el Mediterráneo se constituyó así en la gran salina mundial. En ella había acabado un buen porcentaje de la sal de los océanos, los cuales experimentaron una crisis salina al reducirse su salinidad global en hasta un 2 por mil. El suelo del mar Mediterráneo, al perder el peso del agua que contenía, se elevó entre decenas y centenares de metros. El paisaje que emergió del fondo debió asemejarse a una región semi desértica, con lagunas de aguas salobres, por donde los animales podían pasar de África a Europa por su propio pie. Hay documentados en las proximidades de Valencia, España, restos de camellos africanos datados en esta época.[1] Los ríos que desembocaban en esta tremenda cuenca vacía lo hacían a través de las capas sedimentarias antiguas, formando grandes cañones de hasta mil metros de profundidad semejantes al

cañón del Colorado, como los gigantescos cañones excavados por el Nilo o el Ródano.



Representación artística de la evolución del proceso de desecación del Mediterráneo durante el Cenozoico (a partir de wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

En la fase más crítica del aislamiento de la cuenca mediterránea hace 5,3 millones de años, las condiciones de nivel del Atlántico o de erosión en el istmo entre ambas cuencas fueron tales que las aguas rompieron el dique que las separaba, rellenando de nuevo la inmensa cubeta mediterránea. Por diversos estudios geológicos [2] se conjetura que el ritmo de llenado fue brutal, de forma que el nivel pudo haber subido hasta unos diez metros diarios.[3] Por aquel entonces comenzaban a andar por el mundo los primeros homininos.

Otro de los acontecimientos geológicos más importantes del Cenozoico fue la formación del istmo de Panamá hace unos tres millones de años. La aproximación de las placas de Norteamérica y

de Sudamérica provocaría una elevación del terreno en el punto de colisión a la vez de un extraordinario vulcanismo. La consecuencia fue la aparición en la zona intermedia de innumerables islas que con el paso del tiempo fueron uniéndose al rellenarse los canales que las separaban con los sedimentos de ambos continentes.

El cierre del istmo supuso, por un lado, un cambio climatológico brutal en el planeta, que posiblemente facilitó definitivamente la congelación del casquete polar septentrional, y por otro el fin del aislamiento de la fauna sudamericana, ya que el puente hizo más fácil a animales y plantas el migrar entre los dos continentes.

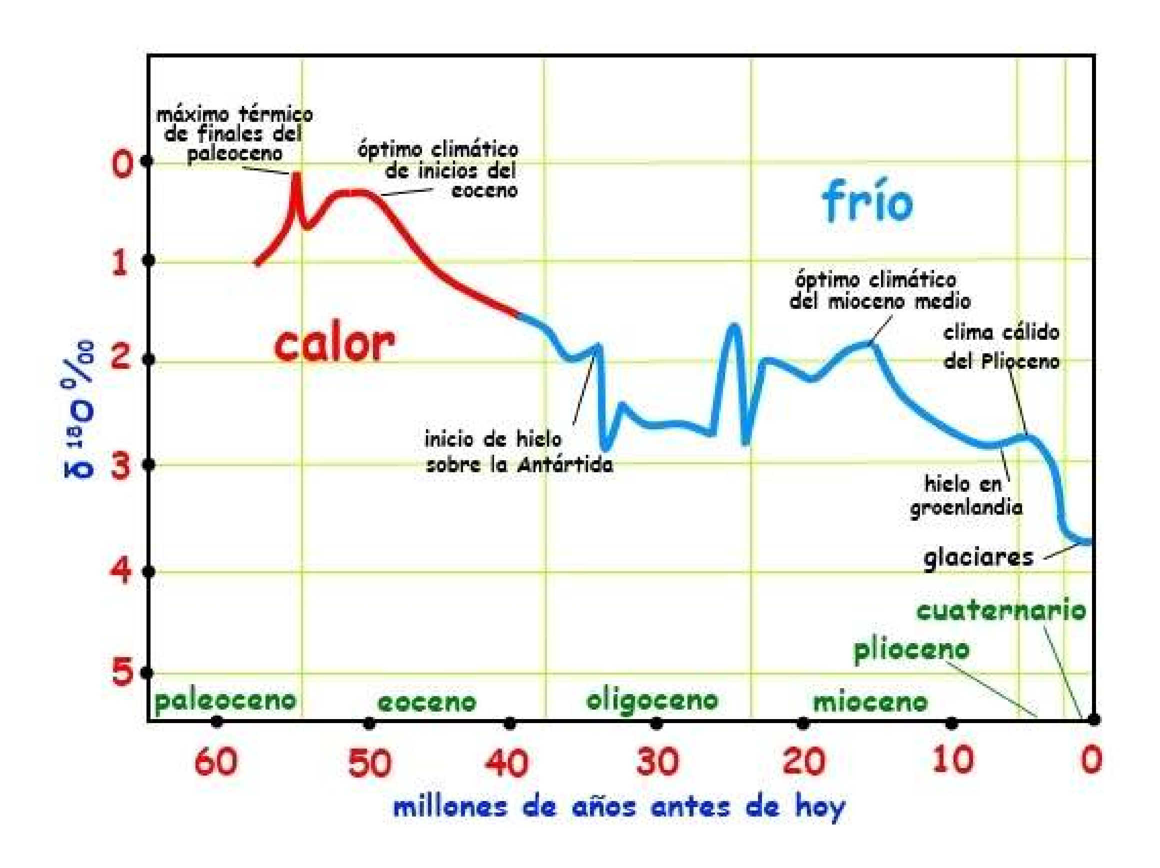
Con esto concluimos el análisis del *escenario geográfico* del Cenozoico. Pasemos ahora a desgranar el *escenario climático*, el otro elemento crucial en el campo de la selección natural y la evolución de la Vida.

El clima

El Cenozoico comenzó conservador: mantuvo en sus inicios el clima caluroso heredado de finales del Mesozoico. Tras este primer periodo de clima benigno se inició hace aproximadamente 40 millones de años un definitivo enfriamiento, modulado en una primera fase por un estancamiento de las temperaturas para después emprender un camino progresivo y constante hacia temperaturas más bajas, finalizando con una última era glacial, edad en la que nos encontramos actualmente.

La figura que sigue muestra esta tendencia (en términos de concentración del isótopo ^{18}O) durante los últimos 60 millones de años de historia de la Tierra. La correlación de este isótopo con la temperatura ambiente se explica por el hecho de que en épocas frías el agua con el isótopo 18 se evapora con más dificultad, por su mayor peso, que como lo hace la que tiene en su molécula el más abundante ^{16}O. Debido a esta circunstancia se va incrementando la concentración del ^{18}O en el mar y disminuyendo su presencia en las precipitaciones y por tanto en los hielos. Por el análisis de este

isótopo en los restos fósiles de caparazones de foraminíferos en el mar -con más isótopo pesado en los momentos fríos- y de los sondeos de los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártida -con menos isótopo pesado en los momentos fríos-, se pueden conocer las temperaturas de una época.



El enfriamiento general del Cenozoico (a partir de "Historia del clima de la Tierra", Antón Urtiarte, fair use)

Pasemos a explicar las teorías que explican el perfil de temperaturas de la figura anterior. Como se puede apreciar, dentro de una tendencia generalizada al incremento del frío, presenta muchos episodios de recuperación de la temperatura.

A comienzos del Cenozoico el planeta sufre uno de los más rápidos y extremos calentamientos de su historia, subiendo las temperaturas medias hasta 7ºC en latitudes altas. La duración de esta etapa fue de menos de 100.000 años. Se supone que este sobrecalentamiento se

vio favorecido por la especial configuración de tierras alrededor del Ártico que impidió que éste se congelara evitándose el consiguiente efecto "nevera" en el resto del planeta. Este incremento de temperaturas provocó importantes extinciones de especies, tanto animales como vegetales, que marcan la diferencia entre las formas de vida del Paleoceno y las del Eoceno.



Mapa frontera entre el Paleoceno y el Eoceno, hace unos 55 millones de años. El Ártico quedaba bastante protegido por la posición de los continentes boreales.

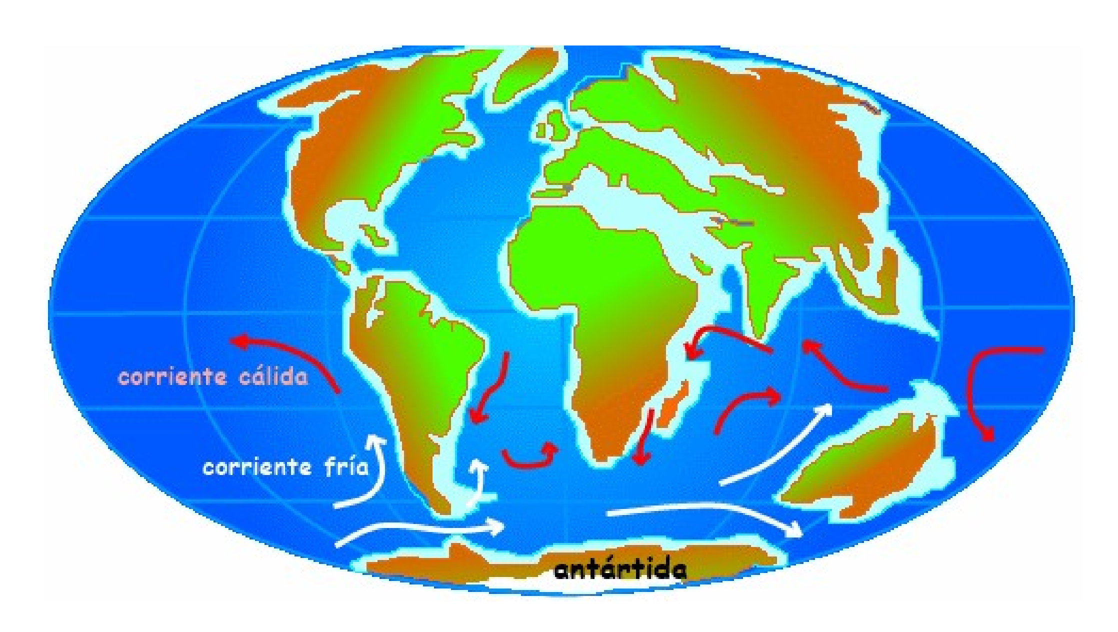
En los años frontera entre el Paleoceno y el Eoceno se mantiene este régimen de altas temperaturas con un clima global que fue el más homogéneo de todo el Cenozoico. La diferencia de temperaturas entre el ecuador y los polos era la mitad de la actual. Las corrientes profundas en los océanos eran excepcionalmente cálidas y las regiones polares, templadas.

Aunque pronto, aún dentro del Eoceno, comenzó el declive de las temperaturas. Esto supuso el inicio de lo que iba a ser más tarde un largo periodo de clima "nevera", durante el que se llegaría a situaciones en las que en cualquier estación del año se podían

encontrar mantos de hielo abundante recubriendo la Antártida e incluso Groenlandia.

Son varias las causas que se barajan para explicar esta bajada de temperaturas en el planeta que sucedía cuando el calendario marcaba el año 50 millones antes de hoy.

Algunos oceanógrafos creen que debido a los movimientos geológicos tan importantes que se estaban produciendo en aquellos momentos, entre los que habría que tener en cuenta la propia deriva de las placas continentales, se indujeron *cambios en la circulación de las aguas oceánicas* que a su vez provocaron *cambios en la circulación atmosférica* y, como consecuencia, una modificación de la temperatura de las aguas profundas marinas. Tras 15 millones de años ésta pasó de los 12ºC a los 6ºC (hoy en día está en el entorno de los 2ºC). A este fenómeno se le unió un *descenso en la concentración del* CO_2 con la consiguiente disminución del efecto invernadero.



Posible distribución de las corrientes marinas en la zona de influencia de la Antártida hace 35 millones de años, tras la apertura del canal circumpolar por la separación del continente australiano

Si seguimos avanzando por la curva de temperaturas de un poco más arriba veremos que hace unos 35 millones de años se produjo un brusco descenso coincidiendo en lo que allí se describe como el inicio de los hielos sobre la Antártida. En aquel momento se estaba separando Australia del continente antártico, lo que hizo que se abrieran mares que dejaron a este último aislado del resto de tierras y en la posición del Polo Sur. Esta especial *configuración de tierras en la Antártida* permitió que las corrientes frías circumpolares aislaran a este continente de la posible influencia de las corrientes cálidas tropicales. A partir de entonces se cubrió de un casquete glaciar que aún dura en la actualidad.

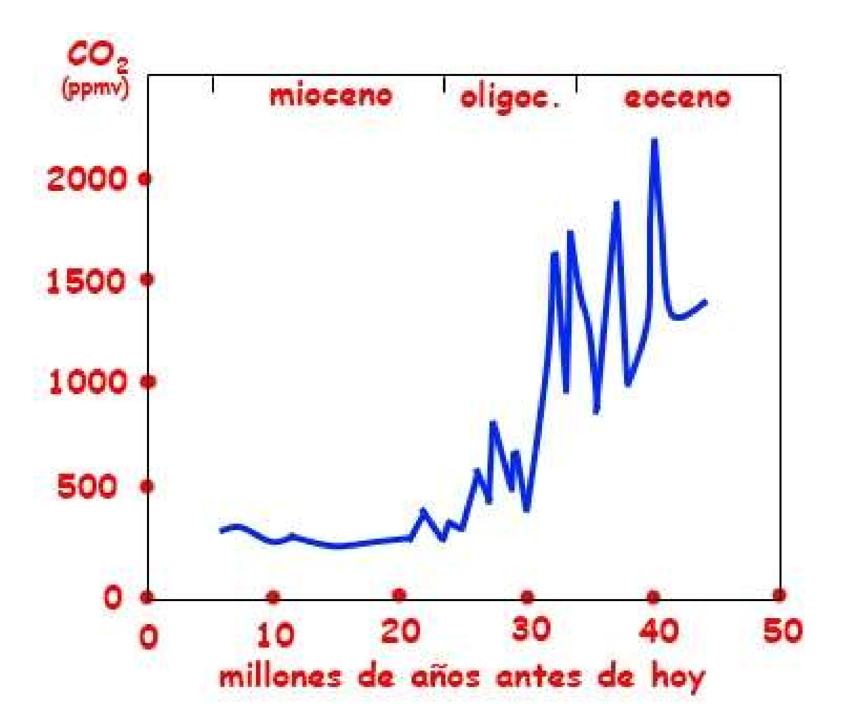
Como consecuencia del secuestro del agua en las inmensas capas de hielo sobre la Antártida se indujo una *disminución de la humedad atmosférica*, lo que incidió en el clima, además de que *descendieron los niveles de las aguas* de los mares. Ambas circunstancias hicieron que se incrementara la superficie de tierra con un clima continental. Este tipo de clima es conocido por ser muy extremo, siendo las diferencias de temperaturas entre invierno y verano enormes, así como entre el día y la noche. Los veranos son calientes y los inviernos muy fríos, con muchas heladas. Por lo general las lluvias son escasas, debido a que este clima se produce en zonas alejadas del mar y con una atmósfera seca como era la de aquel momento. Esto influyó en la biota vegetal, que sufrió una regresión en las latitudes altas del hemisferio norte en donde los bosques de coníferas dieron paso a la tundra.

Hacia finales del Oligoceno (hace unos 25 millones de años) se invirtió temporalmente el proceso, de forma que en toda la primera parte de la siguiente época, el Mioceno, se incrementó y mantuvo un nivel de temperaturas más alto aunque aún dentro de un entorno frío.

El nuevo máximo de temperatura se alcanzó en el Mioceno Medio, entre hace 17 y 14,5 millones de años que es cuando, como consecuencia de ello, el volumen de los hielos de la Antártida vuelve a disminuir y el nivel del mar se eleva. Se sabe por los análisis de

los fósiles oceánicos y continentales que en aquel momento las temperaturas en las latitudes medias fueron 6ºC superiores a las actuales. Gradualmente las latitudes altas del hemisferio norte vuelven a hacerse más cálidas, por lo que las coníferas recuperan de nuevo posiciones a costa de la regresión de la tundra.

Mientras, la concentración del CO_2 seguía disminuyendo, atemperando el efecto invernadero y colaborando en el reencuentro de la senda de enfriamiento progresivo de la Tierra.



Evolución de la concentración de CO_2 (según datos extraídos de Pagani [4], fair use)

Avancemos un poco en el tiempo. Hace 7 millones de años, aún en el Mioceno, una variación en la inclinación del eje de la Tierra hizo que los periodos de insolación sobre las zonas polares disminuyeran. Ello provocó un crecimiento de los hielos de la Antártida y la aparición de un casquete glaciar norte hasta latitudes de Groenlandia.

Ya a inicios del Plioceno, dos millones de años y medio después, se vuelve a invertir la tendencia, alcanzándose un máximo en las

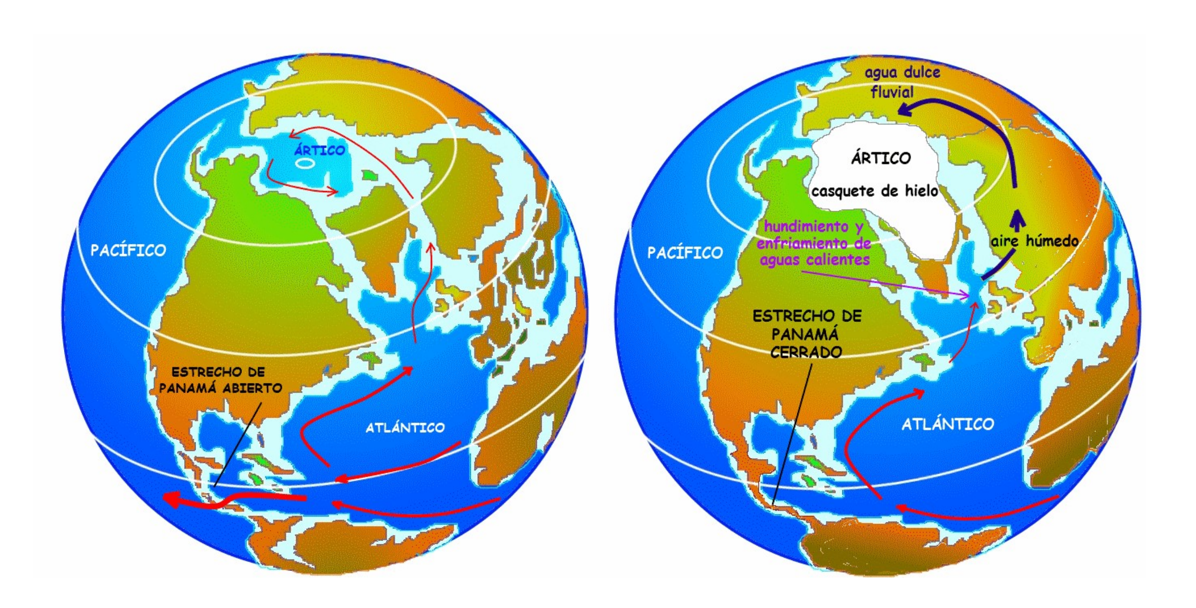
temperaturas hace unos tres millones de años. Se le conoce como el óptimo climático del Plioceno medio. Las temperaturas medias habían subido también, esta vez por la dinámica de los continentes, llegando a valores unos 3ºC superiores a los actuales. No se sabe muy bien el porqué de este fenómeno, aunque se cree que las corrientes oceánicas tanto del Pacífico como del Atlántico eran tan potentes que ayudaron a unificar las temperaturas norte-sur. De todas formas, tras este reducido lapso de tiempo la tendencia al enfriamiento continuó.

Una de las posibles explicaciones del nuevo impulso a la baja es el incremento de los hielos, ahora en el boreal Ártico. Por esa época, hace tres millones de años, se acababa de cerrar el istmo de Panamá, lo que reforzó la corriente del Golfo en su viaje por la costa este americana. Antes, parte de esta corriente se perdía hacia el Pacífico por el "estrecho" de Panamá. La nueva situación tuvo como consecuencia dos efectos.

El *primero* es que en las latitudes más nórdicas del Atlántico las aguas se volvieron más calientes y la atmósfera más húmeda, por lo que los vientos del oeste llevaron más lluvias sobre el norte del continente euroasiático. Los ríos de la vertiente norte se volvieron más caudalosos, provocando una disminución de la salinidad de las aguas árticas, con lo que el punto de congelación subió facilitando el aumento de la masa helada.

Por otro lado, la corriente del Golfo, al no desviarse en parte por el "estrecho" de Panamá, hacía que tras su camino hacia el norte lamiendo las costas americanas llevaran más cantidad de sales a las latitudes árticas. A más sal más densidad del agua, o lo que es lo mismo, más peso. Por lo que antes de llegar al Ártico la corriente se hundía, perdiéndose su aporte térmico. Anteriormente al cierre de Panamá esto no sucedía así. Las corrientes de aguas llegaban con menor salinidad, por lo que se mantenían superficiales a lo largo de un mayor recorrido. El aporte térmico inherente a estas corrientes

podía penetrar por tanto más profundamente en el Ártico, lo que dificultaría la creación de hielos.

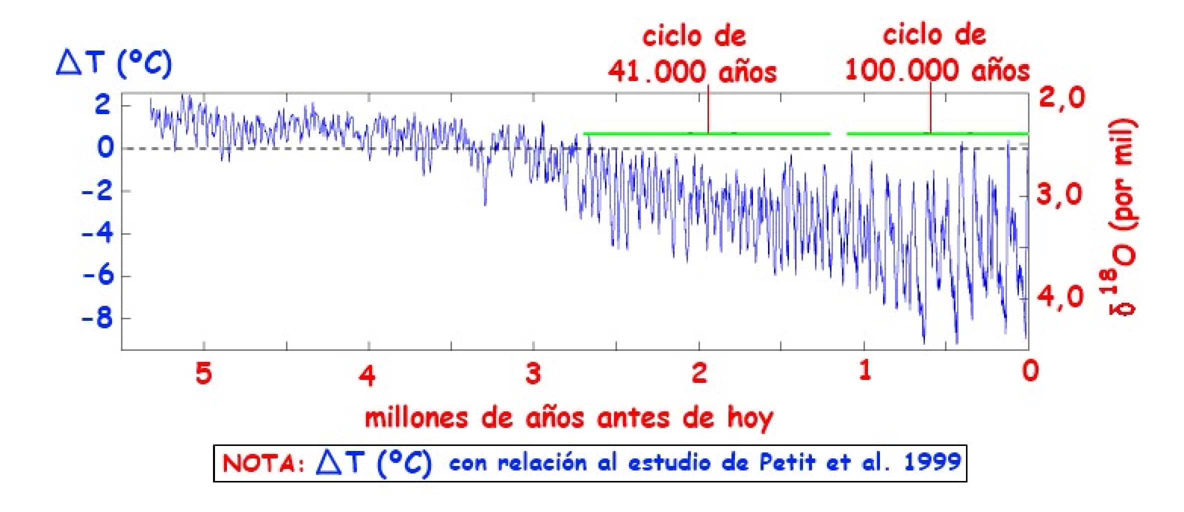


Disparador del enfriamiento de la era terciaria. Las corrientes árticas antes y después de cerrarse el estrecho de Panamá.

El progresivo crecimiento del casquete Ártico, unido a las intensas lluvias provocadas por la corriente del Golfo tanto en Eurasia como en el norte del continente americano, produjeron grandes nevadas en estos territorios. Su acumulación permitía que durase la nieve hasta pasado el verano. Esto hizo que los mantos de hielo ocupasen cada vez latitudes más meridionales durante el Cuaternario, realimentándose el proceso gracias al incremento del albedo terrestre por el que reflejaba una mayor cantidad de radiación solar. El enfriamiento generalizado sufría una serie de avances y retrocesos, con un ritmo aproximado a los 100.000 años que se cree que estaban modulados, por un lado, por los ciclos de rotación del eje de la tierra (cada 40.000 años), y por otro, por las variaciones de la excentricidad de la órbita terrestre, dando como resultado cuatro

grandes glaciaciones en el último millón de años, amén de un sinfín de otras menores.

Y así hasta el día de hoy en el que, aunque inmersos desde hace 10 mil años en el periodo postglaciar del Holoceno, se supone que estamos experimentando un calentamiento climático.



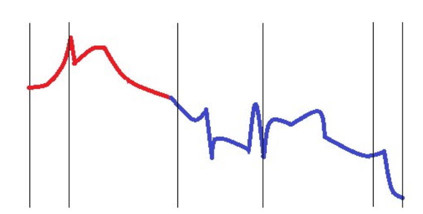
Perfil de la evolución de las temperaturas en los últimos cinco millones de años a partir de un estudio del isótopo $\delta^{18}O$ en los carbonatos de foraminíferos bentónicos.[5] Se puede apreciar en su variabilidad las secuencias alternantes de periodos glaciales e interglaciares en los últimos millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported,[6] fair use)

Somero prólogo, anuncio de lo que vendrá, sobre la biota del Terciario

La biosfera prosiguió amoldada al vals del clima y las temperaturas. Con una complejidad quizás similar a la de épocas anteriores, pero aparentemente más prolija gracias en parte al grado de conocimiento que disponemos de ella. En los siguientes capítulos nos vamos a encontrar paseando por los brotes más extremos del árbol filogenético, infinitos en forma y diversidad. A partir de aquí, la sensación de que la biografía de la Vida se transforma en un lago cabrilleante es absoluta. Reverbera acá y allá haciendo que concentremos nuestra atención en los puntos que más brillan. Hay

tantos que hay que dejar de lado a muchos de ellos, forzados por el obligado avanzar de esta historia. Nuestro relato a partir de aquí va a intentar hacer un seguimiento de lo más sorprendente desde el punto de vista de la curiosidad antropocéntrica, cabalgando a lomos de un hilo conductor que nos ate al relato: la secuencia climática de los últimos 65 millones de años.

El siguiente icono nos hará de guía en las próximas capítulos. Se trata de una imagen estilizada del perfil de temperaturas del Cenozoico que ya dibujamos un poco más arriba.



Nos servirá de recordatorio para rehacer una imagen mental de las condiciones de contorno durante esos años: una cúspide inicial de temperaturas seguida de un descenso importante, para mantenerse hacia mediados del periodo marcando una nueva meseta antes de iniciar la caída en picado hacia la era de las glaciaciones. Y todo ello en un escenario geográfico de territorios aislados. Ésta será la senda a seguir a partir del próximo capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 47:

1. Se refiere a la paleofauna encontrada en el yacimiento de Puente la Vía, en el municipio de la Venta del Moro, Valencia. "*Fossil camels from the Upper Miocene of Europe: implications for biogeography and faunal change*", Martin Pickford et al. Más información en un artículo publicado en la revista Nature de octubre de 1993.

2. "*Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian salinity crisis*", D. Garcia-Castellanos et al., publicado en la revista Nature en septiembre de 2009, y "*Computational fluid dynamics simulations of the Zanclean catastrophic flood of the Mediterranean (5.33 Ma)*", Raul Periáñez y J. M. Abril (febreo 2015).

3. NdE: Si mis cuentas no están mal, eso es un flujo del orden de los millones de metros cúbicos por segundo, por un canal de unos cuantos kilómetros de ancho. Por comparar, el Amazonas tiene un caudal de unos 200.000m^3/s en un ancho similar. ¿Os imagináis el espectáculo?

4. "*Marked Decline in Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations During the Paleogene*", Mark Pagani et al. Publicado en la revista Science de julio 2005.

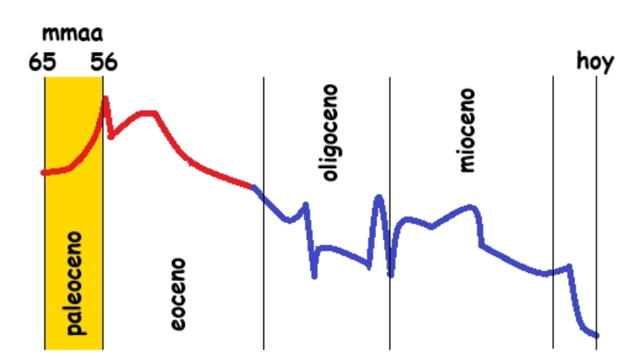
5. "*A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic D18O records*", Lorraine E. Lisiecki y Maureen E. Raymo, publicado en Paleoceanography en 2005. Este estudio ha sido publicado en la revista Paleoceanography, vol. 20, en enero de 2005.

6. NOTA: Petit et al., 1999. "*Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica*", publicado en la revista Nature de junio de 1999.

48. El Paleoceno

En el capítulo anterior nos habíamos adentrado en una nueva era, el Cenozoico. Allí hicimos una descripción del escenario general, su geografía, geología, climatología y atmósfera. Hoy toca situar a los actores, iniciando cronológicamente el relato por la época del Paleoceno.

El gráfico siguiente nos irá haciendo de guía a lo largo de todos los capítulos dedicados a la descripción de esta era cenozoica. El perfil corresponde al de temperaturas que ya estudiamos en el capítulo anterior. Y es que hay una clara correlación entre los sucesos climáticos de esta era y la evolución de las especies.[1]



El Paleoceno comenzó con un clima cálido y tropical.

Paleo-ceno(zoico), “antigua-nueva vida”, toda una declaración de intenciones. La Vida siguió adelante y se tuvo que sobreponer a la tremenda crisis K/T [2] ocasionada en gran medida, como ya sabemos, por el impacto de Chicxulub, acontecimiento con el que se cerró la esplendorosa época del Mesozoico. Era un mundo donde las plantas estaban sufriendo su particular calvario, donde habían muerto muchos de los grandes animales y los mejor preparados para

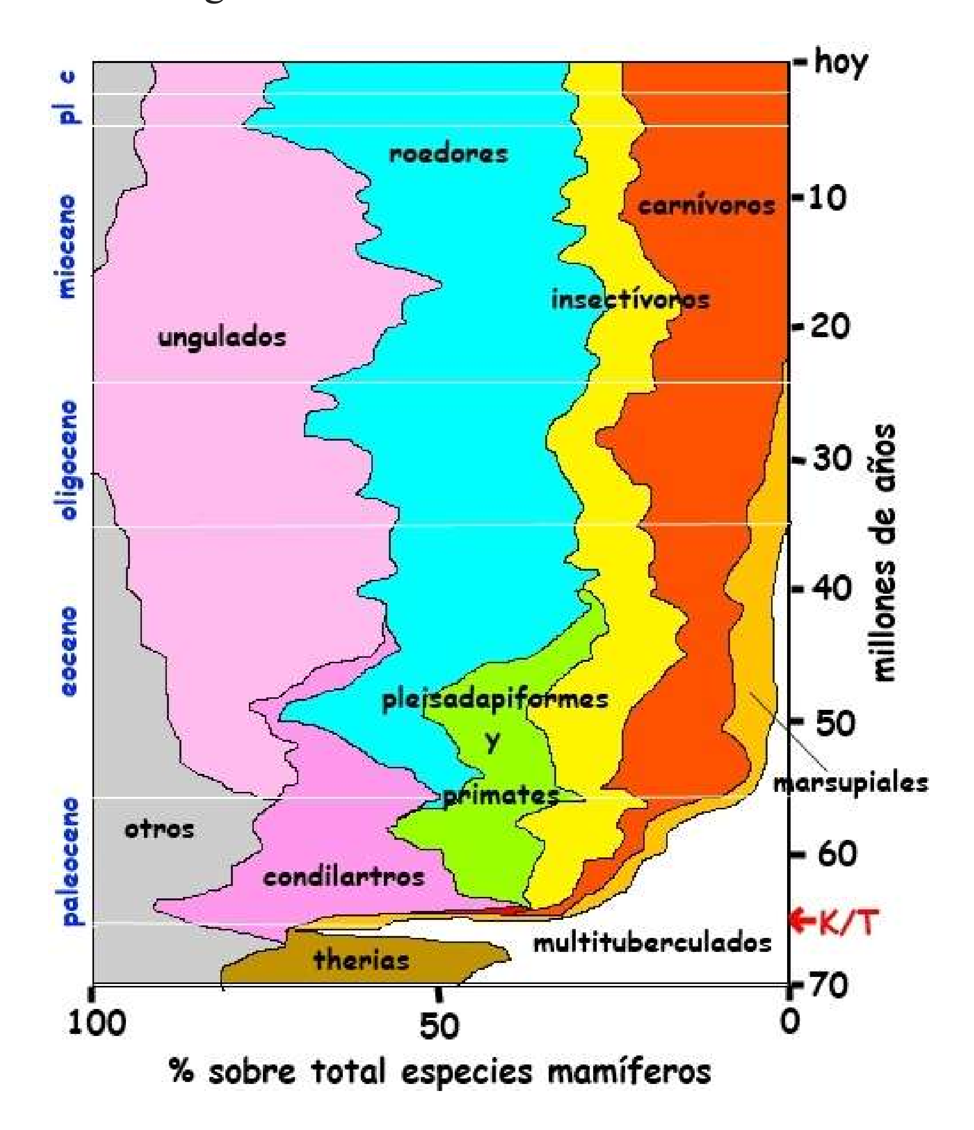
seguir adelante soportaban las consecuencias de la catástrofe como buenamente podían.

Habían desaparecido los dinosaurios, acabando así la presión que ejercían sobre el resto de habitantes del planeta. Hay una correlación clarísima que hace evidente que a los mamíferos supervivientes esta circunstancia les vino bien. El éxito de su radiación y de su diversidad se hizo pronto evidente. Por algo en el capítulo anterior habíamos decidido conceder a esta era el título de la "*de los mamíferos*".

La historia de los mamíferos en Norteamérica nos permite imaginar el esquema general de lo sucedido a nivel global. Por el estudio de sus fósiles se ve que ya desde los primeros miles de años tras la crisis los placentarios habían iniciado una senda hacia mayores tamaños corporales. En el entorno de los 3 a 5 millones de años después, aunque hay biólogos que opinan que el proceso fue más lento -hasta 10 millones de años-, no solamente se había consolidado esta circunstancia sino que también se observa en el registro fósil la gran diversidad de especialización ecológica que caracterizará a las sucesivas especies de estos mamíferos a lo largo de todo el Cenozoico. La misma, con distintas morfologías corporales, que conocemos a día de hoy (ver figura de la página siguiente).

A la vista de ello nos preguntamos: ¿Cómo pudo continuar la vida? Y, ¿con qué rapidez se produjo la recuperación? A los diez millones de años tras la macroextinción se extendían sobre el planeta los roedores, la diversa fauna de los bosques, los grandes herbívoros y carnívoros… Los placentarios habían sabido aprovechar toda la casuística de los vacíos nichos vitales antes utilizados por los dinosaurios. Hoy en día los mamíferos con placenta experimentamos un amplio abanico de formas y estrategias de vida. Desde el minúsculo murciélago abejorro, con su gramo y medio de peso, hasta la ballena azul de 190 toneladas, practicando en la movilidad todo tipo de pericias, como en los ejércitos que se pasean por tierra mar y

aire, zapadores incluidos, y habiendo desarrollado esquemas muy variados de inteligencia.



Esquema aproximado de la radiación de los mamíferos en Norteamérica tras la crisis Cretácico/Terciario. Es evidente la explosión de diversidad en los primeros 10 millones de años tras la crisis (según información de John Alroy, Universidad de California,[3] fair use)

Como veremos también, las plantas, las aves o los peces experimentaron en el Paleoceno unos grandes éxitos en sus carreras evolutivas y de diversificación. Una auténtica explosión de vida nueva.

Tras esta vista panorámica vamos a ir desgranando una por una las andaduras de cada uno de los participantes.

Comencemos por las Plantas

Habíamos comentado en el capítulo anterior que en toda esta primera época del Cenozoico continuó el clima húmedo y cálido del Cretácico. Quizás culpa de ello la tuvo el dióxido de carbono, que en aquellos momentos más que duplicaba su concentración en la atmósfera con relación a la actual. El CO_2 suponía efecto invernadero, es decir, calor. Pero también abundante materia prima aprovechable en los procesos de fotosíntesis de los vegetales a través del ciclo de Calvin (podéis refrescar estos temas en los capítulos 07 y 08). La gran ventaja para las plantas es que sus ciclos reproductivos se basan en semillas o esporas, estructuras preparadas para soportar mejor las situaciones de estrés. Gracias a esta circunstancia su recuperación tras la crisis K/T fue menos traumática que la de los animales. De hecho, eso es lo que se observa al analizar su registro fósil: un agudo perfil temporal de merma seguida de una rápida recuperación.

Todas estas circunstancias favorables, unidas al vacío en los hábitats tras la catástrofe, fomentaron el que poco a poco se fuera de nuevo rellenando el planeta de plantas. A inicios del Paleoceno se observa en el mundo vegetal un gran incremento de fósiles de pólenes de helechos, señal evidente del efecto de la crisis sobre los inmensos bosques anteriores cuyos emplazamientos fueron ocupados por estas oportunistas arbustáceas. Los helechos son a menudo las primeras especies que colonizan las zonas dañadas, como sucede en la actualidad tras un incendio forestal.

Al poco tiempo las angiospermas comenzaron rápidamente a recuperarse, de forma que vuelven a ser las dominantes del panorama durante el Paleoceno como lo fueron a finales del Cretácico. Posiblemente en este camino fueron apoyadas por la

actuación de los insectos, ya que se observa un proceso de coevolución entre ambos tipos de organismos.

La crisis había pasado y la Tierra comenzaba a cubrirse de espesos bosques al amparo del amable clima. En general las masas arbóreas debían ser más densas que durante el Mesozoico, ya que no tenían la presión depredadora de los grandes dinosaurios herbívoros, y los registros fósiles así lo atestiguan. En Castle Rock, Colorado, se han encontrado restos de un bosque húmedo datado en hace 63,8 millones de años en el que ya prosperaban las angiospermas, coníferas, helechos y cícadas, con una tipología semejante a la de las actuales selvas ecuatoriales. Lo mismo sucede en el yacimiento de Cerrejón, Colombia, datado en hace 58 millones de años, en donde los especímenes vegetales fósiles son los mismos de los actuales bosques tropicales sudamericanos.



Recreación de un bosque húmedo del Paleoceno (Autor: Jan Vriesen, Denver Museum of Nature and Science, fair use)

Está claro que en los nuevos bosques de los trópicos han aparecido por primera vez los fenotipos de las selvas húmedas modernas. Los territorios más secos no se quedaron rezagados, y en ellos evolucionaron plantas adaptadas a sus condiciones. Se empezaron a ver cactus y palmeras, incluso en lo que hoy es territorio de Alaska. Y esto se sabe [4] porque se ha logrado recuperar de los fondos marinos de la Antártida polen fosilizado de palmeras del Eoceno inferior, hace entre 55 y 48 millones de años, lo que confirma la presencia de bosques tropicales muy diversos y revela unas temperaturas invernales cálidas.

Y si nos desplazamos a latitudes tan altas como las de Groenlandia y Patagonia, una por el norte y la otra por el sur, en un momento en que las regiones polares se encontraban libres de hielos, también se observa que estas zonas se vieron recubiertas por bosques de coníferas y modernas angiospermas de hoja caduca. Estas últimas perfeccionaron sus estrategias reproductoras mediante el truco de adelantar la floración al nacimiento de las hojas para favorecer la polinización por parte de los insectos.

Hace 60 millones de años aparecen por primera vez las *plantas de flor compuesta* de las que es más que justo el hacer una mención especial dada su ubicuidad, importancia ecológica y su utilidad para los seres humanos. Su complejo diseño floral es extremadamente eficiente en lo que respecta a la fertilización del óvulo y a una exitosa diseminación de las semillas.

Por otro lado, tienen un curioso metabolismo adicional mediante el que producen una serie de compuestos químicos, como aceites aromáticos, que no sólo les sirven para su propio desarrollo, sino también como defensa frente a los predadores o a posibles enfermedades. En un futuro muy próximo, como veremos en un capítulo posterior, se producirá el gran éxito de las plantas herbáceas, el cual posiblemente se deba a este tipo de floración.

Seguiremos con las Aves

La crisis se había llevado por delante a las aves pioneras del Cretácico, tales como las marinas Hesperornithiformes y las ubícuas Enantiornithes. Podemos rememorar su existencia revisando el capítulo 44. No obstante, como no podía ser menos dadas las favorables condiciones medioambientales, las aves supervivientes de la extinción K/T comenzaron pronto una fase de nueva radiación y diversificación, apoyada en las oportunidades de los vacíos nichos ecológicos, que dio como resultado formas ya muy similares a las de las aves modernas. Eran las Neornithe, las "*nuevas aves*". El proceso tras la crisis fue muy rápido, concretándose en la radiación explosiva de 16 nuevos órdenes repartidos entre sus dos superórdenes: el Paleognata, en la que se incluyen a aves tan diferentes como las perdices y todas las no voladoras -avestruces, emúes, ñandúes y hermanas-; y el Neognata, del que ya conocemos su incipiente presencia en el Cretácico con los Anseriformes y Galliformes, y que un poco después del límite del Paleoceno con el Eoceno incorporaría la radiación de todos los grupos de los pájaros modernos. En resumen, tan "sólo" 10 millones de años tras la frontera K/T ya estaban presentes la mayoría de órdenes a excepción del de los pájaros a los que les faltaba muy poco. En la actualidad, las aves están clasificadas dentro de 28 órdenes con más de 10.000 especies.

Por su singularidad haremos mención a unas aves que debieron ser los matones del barrio en aquella época y durante muchos años después. Están extintas y sólo se las conoce por sus fósiles: las "*aves del terror*", que nacidas en el Paleoceno dominaron durante las épocas intermedias más frías del Cenozoico. Originarias de Sudamérica, sus especies más grandes llegaron también a colonizar el hemisferio norte tras la formación del "istmo centroamericano", constituyéndose como los predadores que estaban en la cima de la cadena trófica, uno de los carnívoros más temibles de su tiempo. Tendrían una talla de entre uno y dos metros y debían ser extremadamente rápidas en las grandes llanuras donde vivieron.

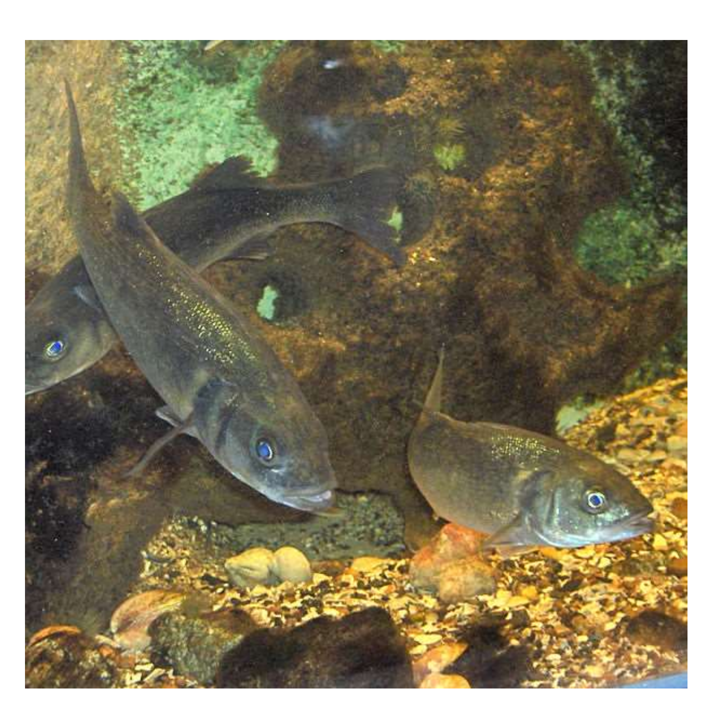


Representación artística de Titanis, una de las conocidas como "aves del terror" (Wikimedia, GFDL 1.2)

Y con los Peces

La masacre había sido bastante más suave bajo la protección de una capa de agua. Habían sufrido más aquellos animales cuyos hábitats se habían modificado de alguna manera, como fue el caso de los peces cartilaginosos -tiburones y rayas- que, acostumbrados a vivir entre aguas dulces y saladas, veían cómo los ríos vertían sus aguas a mares cada vez más alejados de su nacimiento. Pero la buena época les llegó también a ellos. En el Paleoceno se recuperaron los tiburones y se acabó de completar la radiación de especies en los peces actinopterigios, los que tienen aletas soportadas mediante radios espinosos, que habían aparecido allá por el Carbonífero. Y de esta clase, los que obtuvieron un particular éxito de diversificación fueron los teleósteos, es decir aquellos peces más comunes que podemos identificar modernamente en nuestras pescaderías, como los salmones, merluzas, barbos…

A partir del abundante registro fósil de los teleósteos se observa durante esta época un sustancial incremento en la variedad de formas así como una predominancia, que llegará hasta nuestros días, de su familia Perciforme, los peces con forma de perca tanto de agua dulce como salada. Besugos, doradas, el rape o el salmonete nos permiten saber de qué hablamos.



Un par de lubinas, otro ejemplo de peces perciformes (Wikimedia, GFDL 1.2)

Son animales bastante voraces y están especializados en un amplio abanico de presas según sea su tamaño. Desde otros peces a crustáceos, plancton o incluso desparasitando a sus vecinos. Hay dos circunstancias corporales que les acompañan en su camino a la cima taxonómica y que sin lugar a dudas tuvieron relevancia para ello. Uno fue el nuevo diseño de planos corporales generales, diferentes a los que se veían anteriormente durante el Cretácico; y otro la modificación de la inserción de las aletas dorsales y anales, base de novedosas estrategias de movimiento. Apuntaría una tercera más de tipo de hábitos: el hueco en la depredación dejado por la crisis de los tiburones fue aprovechado rápidamente por este tipo de peces.

Como resumen, podríamos decir que en el nuevo mundo acuático se produjo un cambio en las posiciones predominantes, perdiendo los tiburones su ventaja en favor de los peces teleósteos. En la actualidad, unos 60 millones de años después, el número de sus diferentes especies alcanza la impactante cifra de 20.000, aproximadamente una tercera parte de la de todos los vertebrados.

Y Reptiles

No nos olvidamos de los reptiles. Tras el golpe recibido en la transición del Cretácico al Terciario se recuperaron, mostrando inicialmente unos tamaños corporales que solían ser más pequeños que los de etapas anteriores, aunque rápidamente algunos especímenes alcanzaron tamaños desmesurados. El cálido clima en aquel momento permitiría a los animales de sangre fría, como eran todos los reptiles, alcanzar mayores dimensiones que los actuales. Hoy en día también encontramos a los "gigantes" en el trópico, mientras que los más pequeños viven en zonas muy alejadas del ecuador. Aunque hay una teoría que pone lo anterior en cuarentena.[5] El metabolismo de estos grandes animales generaría tal calor que les sería imposible vivir en entornos de temperaturas entre 30º y 34º, por lo que deducen que los tamaños corporales derivados a partir del estudio de los fósiles serían muy exagerados. O que no es el clima quién decide el tamaño, porque grandes, lo que se dice grandes, los había muuuy grandes.

En el registro fósil comienzan a ser abundantes los vestigios de tortugas, cocodrilos, lagartos y serpientes. Vamos a por cada uno de ellos.

Los fósiles de tortuga del Paleoceno se encuentran distribuidos prácticamente por todos los continentes, encontrándose en Europa, Norteamérica y Sudamérica así como en África. Merece la pena hablar de *Carbonemys cofrinii*, la "*tortuga del carbón*", encontrada en el rico yacimiento colombiano de la Formación de Cerrejón.[6] Con un cráneo de 24 centímetros y un caparazón de 1,72 metros,

disponía en consonancia unas potentes mandíbulas. Un lento aunque vigoroso kart capaz de comer de todo, incluso a pequeños cocodrilos.



Trabajos en el desenterramiento del caparazón de Carbonemys cofrinii en el yacimiento de Cerrejón (Foto: Edwin Cadena paleontólogo jefe de la excavación, ver nota 6 a pie de capítulo, fair use)

Y hablando de cocodrilos… la crisis K/T prácticamente había dejado como supervivientes a los dirosauridos. Encontramos a sus fósiles en casi todas las zonas del planeta y con una gran variedad de formas dentro de unos también variados hábitats acuáticos. Una de sus principales características que diferencian unos de otros es la forma del cráneo-hocico. Los había de mandíbulas largas y estrechas con múltiples y afilados dientes, que indican una alimentación primaria basada en peces, y los de mandíbulas cortas y anchas, con dientes parcialmente redondeados, que predarían sobre grandes animales como las tortugas. También en la Formación de Cerrejón se ha encontrado el fósil de *Cerrejonisuchus*. No se trata de una especie de grandes dimensiones, unos 2 metros de longitud, y es del tipo de

mandíbula corta, lo que indicaría una evolución hacia una dieta generalista que habría desarrollado al aprovechar algún nuevo nicho de la selva tropical sudamericana. Lo curioso de este cocodriloforme es que con toda seguridad era a la vez predador y predado por mor de su pequeño tamaño ¿Quién era aficionado al costillar de *Cerrejonisuchus?*

Una serpiente ¡Asombroso! No tanto si pensamos que hoy pasa lo mismo entre caimanes y anacondas. Sí, el Paleozoico fue la época de las megaserpientes, comenzando con la que se tomaba de aperitivo a nuestro amigo el cocodrilo colombiano: *Titanoboa cerrejonensis*. Por su nombre ya deduciréis que sus fósiles se han encontrado también en el yacimiento de Cerrejón junto a los del cocodrilo. De la anchura de sus vértebras, 120 milímetros, sus descubridores han deducido [7] una longitud de hasta 12,8 ± 2,2 metros y un peso de bastante más de una tonelada, dejando pequeña a la actual gigante *Python reticulatus,* de 8,7 metros. En Argentina se han encontrado fósiles de la serpiente *Chubutophis* con una longitud estimada de 10 a 12 metros, y en el sureste del Sahara a *Gigantophis garstini,* que superaría los 10 metros. Un Paleoceno lleno de récords.

De los lagartos sólo mencionar al acorazado *Glyptosaurinae,* de la familia de los ánguidos, que agrupa a todos los animales sin patas del suborden de lagartos. Habitaba en los continentes boreales.

Para acabar con los Mamíferos

Vamos ahora a por los que subieron al trono de los antiguos reyes. Tras la crisis, los mamíferos seguían siendo pequeños animales nocturnos, de menos de diez kilos de peso, que se alimentaban de insectos y vegetales. En el capítulo 45 que se dedicó a describir al Cretácico, ya hablamos de que debieron aparecer durante el Jurásico y que posiblemente ya habían experimentando antes de la crisis K/T una cierta diversificación.

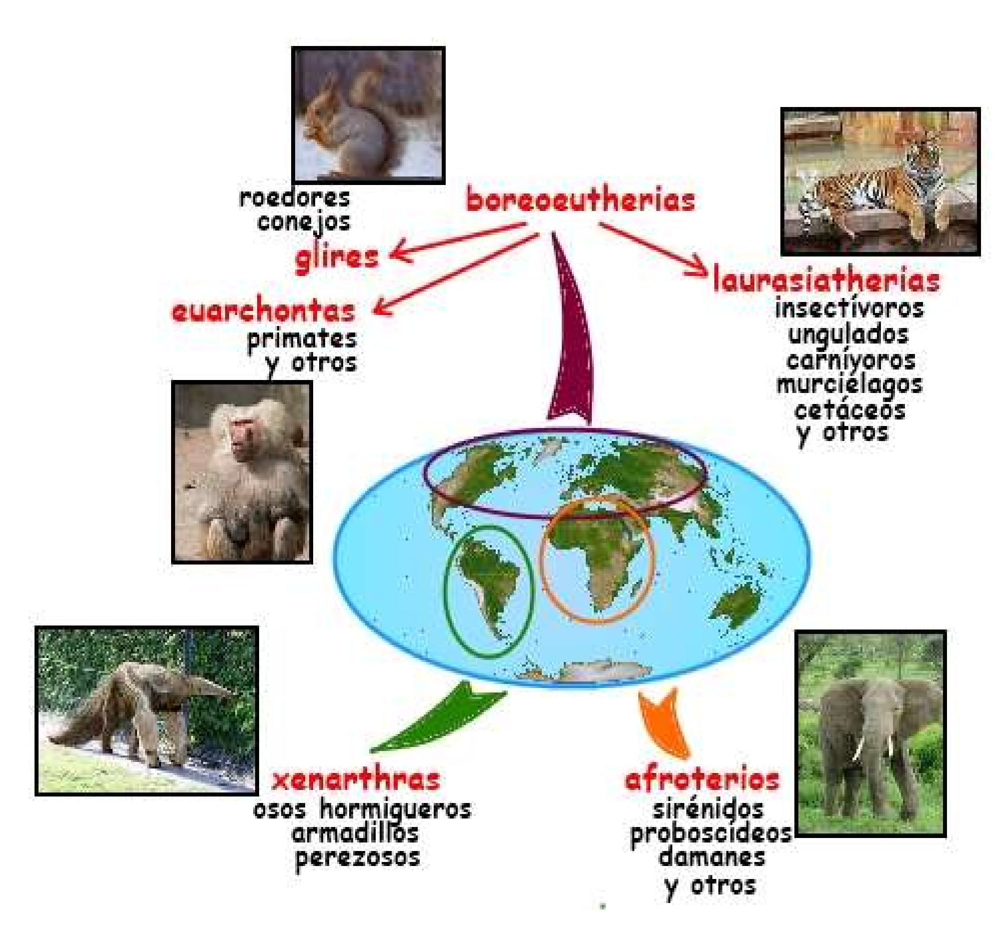
No obstante también comentábamos allí que hay opiniones, como la de la bióloga Maureen A. O'Leary, que aseguran que la diversificación de los mamíferos se produjo a partir de una única especie que logró sobrevivir a la extinción. En un estudio de esta bióloga se llega a proponer la morfología de este animal, que es la que aparece en la figura anterior. Sin entrar en la controversia, sirva simplemente la mención para podernos hacer idea de cómo debían ser nuestros antepasados de hace unos 65 millones de años.[8]



Reconstrucción del fenotipo del posible ancestro de los placentarios que pudo vivir durante el Paleoceno temprano (según el estudio de Maureen O'Leary et al., ver nota 8 a pie de capítulo, fair use)

Sea cual sea la realidad del punto de inicio, en aquellos años fronterizos se estaba gestando en Laurasia, continente que agrupaba a los territorios del hemisferio norte, una gran familia de animales al abrigo de su condición de región aislada y separada de las australes: los **Boreoeutheria**, o "*animales del norte*", que instauraban las bases de un buen número de órdenes mamíferos placentarios que más tarde se irradiarían por todo el planeta. Por un lado avanzaban en su evolución los Laurasiatheria, "*animales de Laurasia*", que agrupaban a los carnívoros, los insectívoros, los ungulados o los

murciélagos. Por otro, su familia hermana los Euarchontoglires, que agrupaba a los “glires”, roedores y lagomorfos (conejos y liebres) y a los “euarcontos” o “*ancestros verdaderos*”, suborden en la que sorprendentemente se refugian los primates.



Distribución geográfica de los inicios evolutivos de los mamíferos placentarios (Imágenes: Wikimedia, dominio público, GFDL 1.2 y CC BY-SA 2.0 Generic)

Se cree que el primer ancestro fósil conocido de estos últimos, los primates, corresponde a uno encontrado en Montana, Estados Unidos. Se trataría de los antiguos plesiadapiformes, de costumbres arborícolas. En particular se habla de *Purgatorius*, una especie de ratilla que correteaba hace casi 65 millones de años por el noreste americano. Aunque no hay constancia clara de la relación directa entre plesiadapiformes y primates, al haber una laguna fósil entre

este animal y los modernos simios, los análisis genéticos parecen indicar que son filos hermanos.

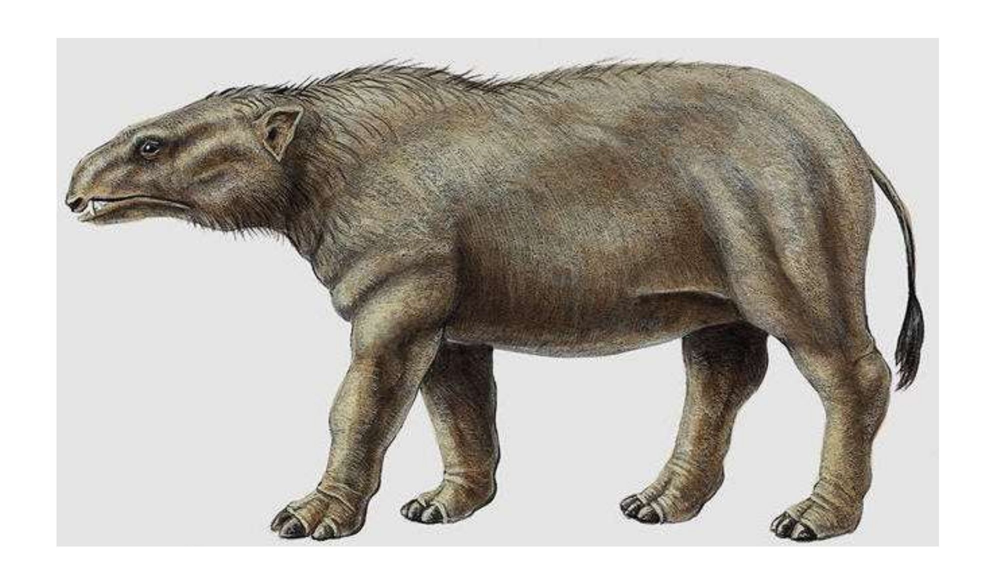


Recreación de Plesiadapis, un plesiadapiforme y de Purgatorius (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Mientras el *Plesiadapis* ocupaba gran parte de Europa y Norteamérica, e incluso Asia, como lo demuestran sus fósiles, los representantes más antiguos de los roedores se extendieron por América del Norte y ya presentaban la configuración mandibular típica de los actuales.

En paralelo a lo que sucedía en Laurasia, sobre la aislada África continuaba la evolución de los **Afrotheria**, los "*animales de África*" de donde procede un fósil de hace 56 millones de años que sería el ancestro común de elefantes y sirénidos, el *Phosphatherium*, un proboscidio herbívoro de hábitos anfibios.

Los afroterios manifiestan una gran diversidad evolutiva, ya que en este superorden podemos encontrar desde los grandes elefantes hasta los minúsculos damanes, desde animales acuáticos como dugones y manatíes hasta zapadores subterráneos como el topo dorado. Y aunque posiblemente no sea un dato relevante, merece la pena comentar por su curiosidad, o al menos así me lo parece, el que casi todos ellos presenten un hocico-nariz significativamente alargado. Hoy en día es bastante clara la cercana relación filogenética entre sus diversos grupos, gracias al estudio de múltiples fósiles de sus diversos taxones en los que se han tenido en cuenta no sólo sus características morfológicas sino también las genéticas.[9]



Representación artística de un Phosphaterium (Wikia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Un caso particular lo presenta la fauna de la isla de Madagascar, situada en aquellos momentos "navegando" entre África y la India. Hace 160 millones de años se habían separado estos dos últimos continentes. Setenta millones de años después, la placa de Madagascar se separaba definitivamente del subcontinente indio, quedando como la isla que es hoy en día. A lo largo de este proceso algunos animales de los dos territorios vecinos habían emigrado a Madagascar, en donde se produjo un proceso de evolución convergente propio que les llevaría a rellenar todos los posibles nichos gracias a morfologías y fisiologías muy semejantes a las conseguidas en la evolución de la fauna africana. Un caso paradigmático lo constituyen los lemures. Hace 62 millones de años se separaron en África de los otros primates, emigrando a Madagascar unos 8 millones de años después, en donde se diversificaron hasta las 50 especies actuales, todas ellas endémicas de este territorio. Esta gran isla contiene en la actualidad alrededor del 5% de todas las especies y plantas del planeta, de las que más del 80% no se encuentran en ningún otro lugar.

En el continente-isla sudamericano también se desarrolla su propia fauna, los **Xenarthra** o los animales de "*articulaciones insólitas*" en referencia a su especial estructura de vértebras lumbares. Nos

estamos refiriendo a los actuales osos hormigueros, armadillos y perezosos. Es un orden que ha sido muy castigado por los avatares climáticos y geográficos, como veremos en un capítulo posterior en donde hablaremos de la predación que sobre ellos ejerció la fauna del norte, recién llegada tras la unión del istmo de Panamá hace unos tres millones de años. De hecho viven hoy en día especímenes de doce géneros solamente, cuando el registro fósil habla de 208 ya extintos.

Con lo anterior llegamos por fin al final del Paleoceno. A lo largo de este capítulo hemos podido seguir las andaduras de la biosfera en su camino de recuperación tras el desastre del año 65 millones antes de hoy. La canoa de la Vida por fin ha logrado sortear las amenazadoras olas que rompían sobre la playa y la encontramos de nuevo navegando hacia su última singladura. En el capítulo que sigue recorreremos un largo periodo de más de 20 millones de años, el Eoceno.

NOTAS DEL CAPÍTULO 48:

1. "*Cenozoic climate change influences mammalian evolutionary dynamics*", Borja Figueirido et al. En una publicación de PNAS de diciembre de 2011 encontraréis más información sobre la correlación climática mencionada.
2. Crisis K/T explicada en el capítulo 46 de este libro.
3. "*Are Sepkoski's evolutionary faunas dynamically coherent?",* John Alroy (2004). Lo podéis encontrar en la web de Evolutionary Ecology Research, 2004, 6: 1–32.
4. "*Persistent near-tropical warmth on the Antarctic continent during the early Eocene epoch*", Jörg Pross et al. Según la publicación de la revista Nature de agosto de 2012.
5. Dicha teoría apareció en la revista Nature de julio de 2009. "*Can the giant snake predict palaeoclimate?*", Mark W. Denn et al.

6. Este es el documento que lo describe. "*New bothremydid turtle (testudines, pleurodira) from the paleocene of northeastern Colombia*", Edwin A. Cadena et al. Publicado en Journal of Paleontology 86(4) 2012.

7. El documento base, "*Giant boid snake from the Palaeocene neotropics reveals hotter past equatorial temperatures*", Jason J. Head et al., se publicó en la revista Nature de julio de 2011, con un suplemento informativo, también en Nature.

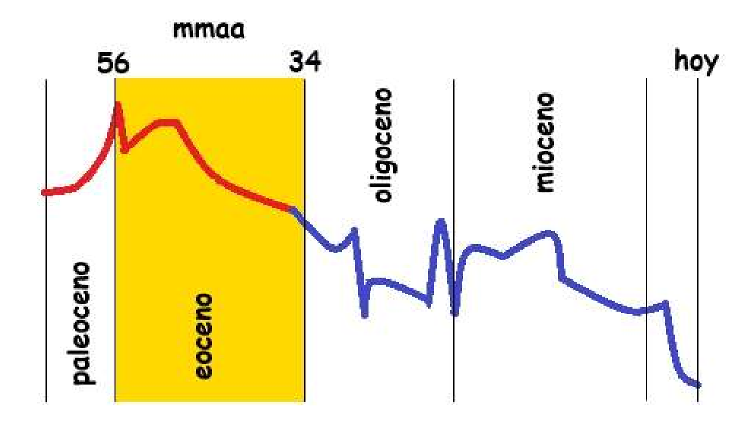
8. "*The Placental Mammal Ancestor and the Post–K-Pg Radiation of Placentals*", Maureen A. O'Leary et al. Podéis leer el mencionado estudio en la revista Science de febrero de 2013.

9. "*A new estimate of afrotherian phylogeny based on simultaneous analysis of genomic, morphological, and fossil evidence*", Erik R Seiffert, noviembre de 2007. En la web BMC Evolutionary Biology, 2007 **7**:224, podéis obtener mayor información sobre el estudio mencionado.

49. El Eoceno

En el capítulo anterior conocimos las peripecias que la Vida tuvo que pasar para no sucumbir definitivamente. No sólo lo consiguió, sino que despedimos el capítulo contemplando cómo su barca surcaba de nuevo el mar con promesas de nuevos éxitos. Nos quedan 56 millones de años hasta el momento actual de punto y seguido.

"*Eo-ceno*"(zoico) significa "*el alba de la nueva vida*". Muy sugerente, ya que por fin se ven como viables a las nuevas formas que poco a poco han ido surgiendo. Al igual que en el capítulo anterior, comentamos aquí que hay una estrecha relación entre el perfil climático y el perfil de diversidad de organismos vivos.[1] Por eso dejamos una vez más nuestro gráfico como inicio del viaje.



Poco a poco las corrientes oceánicas se habían ido modificando de acuerdo al movimiento de los continentes. Las nuevas posiciones relativas entre ellos fueron favoreciendo el enfriamiento general de la atmósfera que, como ya sabemos de lo leído en el capítulo 47 titulado "*Comienza el Terciario*", llevó, tras unos 20 millones de años, al recubrimiento con casquetes helados de la Antártida.

Mientras duraron los buenos momentos climáticos heredados del Paleoceno, las abundantes selvas húmedas siguieron siendo el paisaje más común. Las palmeras y los cactus habitaban Alaska y la Patagonia, mientras que las humildes plantas de flores compuestas dibujaban pequeñas manchas en los anteriores hábitats o junto a las corrientes de agua.

Como consecuencia del progresivo enfriamiento terrestre se estaba produciendo un cambio en las condiciones climáticas de las estaciones, de forma que fueron cada vez más contrastados los veranos y los inviernos. Esta circunstancia afectó a la familia vegetal de distinta manera, dependiendo de la capacidad de resistencia de cada especie en particular. Los árboles caducifolios, gracias a su vaivén estacional de cobertura foliar, estaban muy adaptados a los grandes cambios de temperatura, por lo que comenzaron a imponerse sobre las especies perennes tropicales, de forma que ya hace 38 millones de años aquellos tipos de bosques cubrían vastas regiones en los continentes septentrionales. Las junglas a las que iban sustituyendo solamente lograron resistir en el sur, sobre Sudamérica, India, y Australia. En latitudes todavía más extremas, como era la austral Antártida, que había sido un esplendor de bosques templados subtropicales, se cubrió de grandes regiones de tundra junto a hielos perpetuos. Las zonas más estresadas eran progresivamente conquistadas por las plantas herbáceas de flores compuestas, comenzando así el esplendor de un nuevo biotopo como fueron las praderas.

En el subsuelo de estos entornos herbáceos bullía el mundo social de las hormigas, que estaban iniciando un despegue hacia nuevos hábitos y formas. Posiblemente los modernos biotopos favorecían su evolución. Es el momento en que comienzan en sus galerías una agricultura subterránea de bajo nivel sobre un amplio rango de hongos.[2] Quizás esto último fue el valor diferencial que hizo que poco después, hace unos 50 millones de años, comenzara la radiación de sus formas más modernas que perduran hasta hoy en

día. Ello les permitió ser los insectos dominantes durante muchos años.

Durante esta larga época de transición hacia el frío, y a pesar de que la generalidad de los mamíferos conservaban aún un pequeño tamaño, en el registro fósil ya se empiezan a encontrar evidencias de animales mayores y de morfologías modernas.

Éste era el caso de los primitivos **ungulados**, animales que caminan sobre la punta de los dedos enfundados con pezuñas. La categoría *ungulado* viene del latín "*ungula*", que precisamente quiere decir pezuña. Por lo dicho en los párrafos anteriores se puede entender que el panorama comenzaba a ser el adecuado para los animales que vivían de ramonear las plantas, entre ellos nuestros ungulados, bonanza que les llevó a experimentar en esta época una deriva hacia la diversificación y su consolidación. Aparecen en Laurasia a partir del Paleoceno tardío como una radiación de los mamíferos condilartros que a su vez descendían de animales insectívoros. El nombre de *condilartro* indica un gran avance estructural, ya que significa "*articulación en forma de condil*", o de un hueso encajado en otro -como la rodilla-. En el Paleoceno los ungulados iniciaron su definitiva diversificación en dos familias que luego serían significativamente preponderantes: los perisodáctilos y los artiodáctilos. Para entendernos mejor, "*los que tenían una única pezuña"* en cada pata -léase caballos, tapires o rinocerontes- y "*los que tenían dos"* -léase camellos, rumiantes, cerdos, hipopótamos y sí, aunque parezca mentira, ballenas y delfines-. Ya desvelaremos el misterio.

Los perisodáctilos habrían evolucionado a partir de un pequeño animal con aspecto de oveja, el *Phenacodontidae*, cuyas características anatómicas serán heredadas por sus futuros descendientes. Hace 55 millones de años ya se habían diversificado y extendido por varios continentes. En Norteamérica prosperaron los caballos, surgidos hace 54 millones de años, y los tapires, mientras que los rinocerontes parece ser que radiaron por primera vez en Asia,

pasando más tarde a América a mediados del Eoceno. Estos caballos tempranos, cuyo primer fósil conocido corresponde a *Hyracotherium,* eran muy pequeños, del tamaño de un zorro, y aún tenían varios dedos en sus patas. Los rinocerontes también eran pequeños y aún no habían desarrollado su peculiar cuerno. Dada el corto periodo desde su diversificación, estos últimos se parecerían bastante al caballo o a un tapir de la época.



ARTIODÁCTILO
pata de dromedario
dos pezuñas



PERISODÁCTILO
pata de caballo
una pezuña

Extremidades de los ungulados (Wikimedia, dominio público)

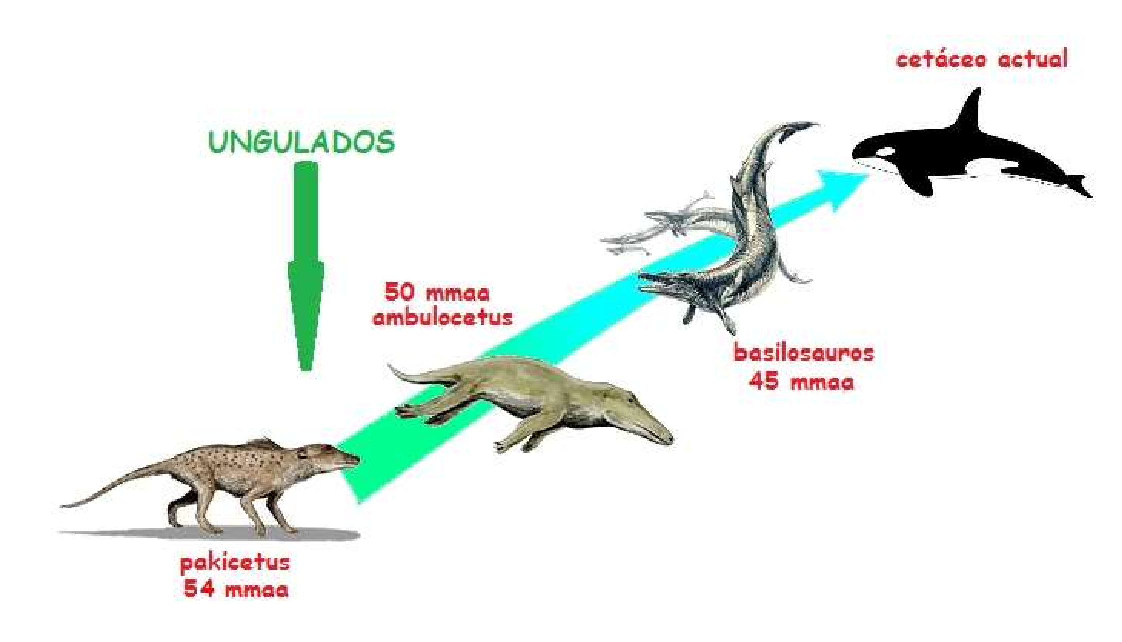
Por su parte los artiodáctilos provenían del condilartro *Arctocyonidae*, una pequeña pero fiera comadreja omnívora del Paleoceno. Sin embargo, los primeros artiodáctilos eran parecidos a los cerdos de hoy en día: animales pequeños de cortas patas que se alimentaban de las partes blandas de las plantas. Ocupaban por lo general hábitats marginales, como consecuencia de que se vieron superados por el mayor éxito de los perisodáctilos. Quizás por ello la evolución llevó a alguno de ellos a practicar estrategias adaptadas a la “miseria”: en esta época es cuando se desarrolló el sistema digestivo *rumiante,* “invento” con el que sobrevivían gracias a que podían procesar alimentos de menor calidad.

También los artiodáctilos, hace unos 52 millones de años, fueron los sujetos de uno de los acontecimientos más importantes en el álbum

familiar de los mamíferos. Sorprendentemente, o al menos a mí me lo parece, de una rama próxima a la de los hipopótamos se desprendió una nueva línea evolutiva que al cabo desembocaría en animales tan esencialmente marinos como lo son las ballenas, los delfines o cachalotes, es decir, el gran orden de los **cetáceos**.

Unos 325 millones de años antes de este acontecimiento, un pez había decidido salir del agua y fundar la familia de los tetrápodos. Ya lo vimos con profusión en el capítulo 32. La selección natural fue modelando a aquellos aventureros siguiendo un sinfín de rutas que les llevaron a través de la difícil tarea de la supervivencia. Una de ellas desembocó en los mamíferos terrestres, abriéndose más tarde la rama de los ungulados de pezuña partida. Se cree que uno de estos artiodáctilos, el pequeño *Indohyus*, pudo ser el eslabón perdido entre los mamíferos terrestres y los cetáceos.[3] El proceso de retorno al agua de los mamíferos descendientes de este animal se inició en el actual Pakistán, en donde un evolucionado carnívoro terrestre, considerado como el primer espécimen del orden Cetacea, el *Pakicetidae,* comenzó a encontrar cómodo el relajar el esfuerzo que suponía mover su cuerpo metiéndose en el agua. Algo así como hacen los hipopótamos. De él hasta los basilosaurios, que ya fueron completamente marinos, pasaron poco más o menos 10 millones de años y una adaptación cada vez mayor a la comodidad del agua y al soporte hidrostático que les ofrecía. Se acomodaron sus oídos, los orificios respiratorios migraron hacia lo alto de la cabeza, las patas delanteras adoptaron la forma de remos, aunque manteniendo la vieja estructura ósea mamífera. Mientras, las extremidades posteriores fueron derivando hasta formar unas palas, que ya no estaban ancladas al cóccix, con las que se propulsaban en un movimiento ondulatorio vertical, semejante al galopar del mamífero terrestre corredor del que provenían. Algunos cetáceos desarrollaron unas láminas córneas -barbas- en la boca que fueron sustituyendo a los dientes, novedad que les permitió colonizar un nuevo nicho de alimentación, el del abundante plancton.

Como veremos unos párrafos más abajo esos no fueron los únicos mamíferos que decidieron volver al mar.



Evolución de los cetáceos (a partir de imágenes de wikimedia, GFDL 1.2)

En África también estaban evolucionando las selvas que se retiraban al ritmo de las bajadas de temperaturas, abriendo espacios a los pastizales en donde estaban prosperando los nuevos animales vegetarianos. Fue a mediados del Eoceno, y dentro de la gran familia de **afrotherios**. Se trataban de unos animales que en principio se pensó que debían ser unos ungulados más. Hoy en día se tiene claro que no es así ya que se considera que son el resultado de un proceso evolutivo convergente por el que algunos animales africanos adoptaron hábitos y formas semejantes a los ungulados europeos. No en vano se les conoce como penungulados, o lo que es lo mismo, los "*casi ungulados*". Se trata de los proboscídeos -elefantes, mamuts y demás narigudos, y también ¡asombroso! los acuáticos sirenios, de los que hoy en día conocemos a los dugongos -de apodo las "*señoras del mar*"-, y los manatíes.

Hace ahora unos 50 millones de años algún tipo de herbívoro africano del clado penungulado inició su vuelta al mar abriendo la senda de los actuales sirenios. En nuestro registro fósil se considera

a *Pezosiren portelli* como el primer de ellos. Era aún un animal cuadrúpedo de costumbres anfibias. Hacia finales del Eoceno el orden sirenio había prosperado ya que datados en esa época se han encontrado multitud de fósiles de manatíes que surcaban las aguas. Los sirénidos siguen siendo los únicos mamíferos marinos hervíboros, un recuerdo indeleble de sus inicios.

Los ancestros de los proboscídeos ya vivían durante los años frontera del Eoceno con la siguiente época, el Oligoceno, hace unos 35 millones de años. Se considera como el más ancestral a *Moeritherium*, que era un relativamente pequeño animal de menos de un metro de altura, con una pequeña trompa y atisbos de colmillos, y un cuerpo semejante al de los hipopótamos, posiblemente ya que ambos ocupaban nichos próximos a las aguas, en este caso del Nilo, consumiendo la vegetación de ribera.

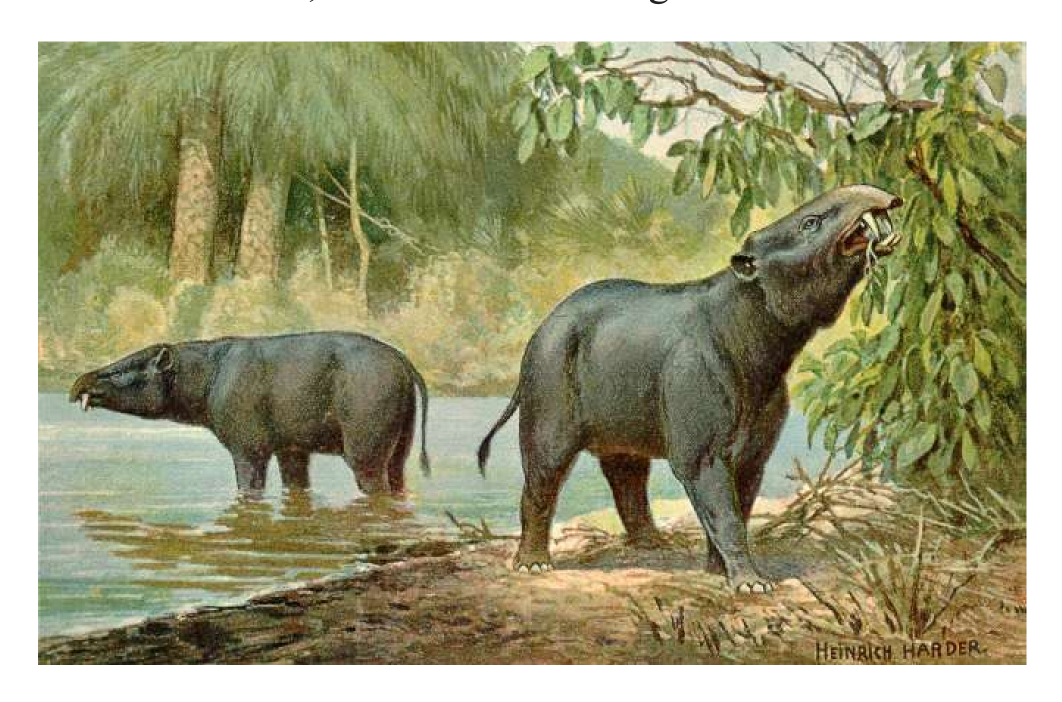


Imagen artística de Moeritherium, uno de los primeros antepasados directos de los elefantes (Wikimedia, dominio público)

Además de las dos aventuras comentadas más arriba acerca del regreso a las primitivas costumbres acuáticas protagonizadas por cetáceos y sirenios, los mamíferos aún tenían que representar un

tercer acto: el de los pinípedos -focas, morsas, lobos de mar…-. Pero eso sería bastante más tarde, hace ahora unos 25 millones de años, a finales de la próxima época, el Oligoceno. Debió suceder en latitudes australes ya que el fósil más antiguo de lo que parece ser fue un animal de transición, *Puijila darwini*, se ha encontrado en la Antártida.[4] Su aspecto externo sería como el de las nutrias actuales, lo que permite conjeturar que los pinípedos debieron pasar por una fase de agua dulce similar a la de aquellos animales.

Los primitivos cetáceos y sirenios, tras su vuelta al mar, se encontraron con los tiburones que habían experimentado una gran diversificación. En algún caso hacia especies de gran tamaño, como el *Otodus obliquus*, que podía alcanzar los nueve metros de longitud y que se alimentaba de mamíferos marinos, peces y de otros tiburones.

Volvamos a tierra. En esta época los **roedores**, que habían iniciado su andadura hace unos 75 millones de años, se extendieron por Laurasia, en donde a finales del Eoceno ya aparecen la mayoría de los grupos actuales. Entre otros, las ardillas, los castores, los ratones o los lirones. Desde este continente colonizaron más tarde África, en donde dieron lugar al poco tiempo a los Hystricognathi, los cuales consiguieron también en poco tiempo saltar a Sudamérica llevando a cabo la primera repoblación de este territorio por los roedores. En Perú hay evidencias fósiles de roedores datadas en hace 41 millones de años.[5] Posiblemente lo hicieron sobre troncos flotantes, saltando de isla en isla en los relativamente estrechos canales que aún separaban ambos continentes, entre los que se encontraban el archipiélago de San Pedro y San Pablo. A partir de aquellos viajeros hystricognatos en el continente sudamericano radiaron los puercoespines, cobayas, capibaras… Como deducimos de lo dicho, podemos asegurar que este orden placentario es uno de los grandes éxitos en la historia de los mamíferos. Más del 40% de las especies Mammalia son de roedores, y se dice que hay más roedores en el mundo que la suma de todos los mamíferos restantes.

También en esta época, hace unos 50 millones de años, los **carnívoros** iniciaron su diversificación, se cree que en Norteamérica, donde se han encontrado algunos fósiles en Texas formando dos familias: la de los cánidos -perros, lobos, zorros…-, que incluyen también a los osos, y la de los félidos -tigres, leones, gatos…-. Los primeros eran más móviles y acostumbraban a cazar con estrategias poco sofisticadas y más oportunistas. Los félidos, que inicialmente abundaron más en Europa, se mantuvieron en los bosques siguiendo costumbres semiarborícolas y fueron grandes cazadores a la emboscada. Ambos habían modificado su dentadura, de forma que disponían de unos caninos afilados preparados para sujetar a sus presas. Incluso podían ser tan largos como un sable. Las cúspides de sus molares estaban dispuestas en forma de triángulos invertidos que se alternaban en el cierre de las mandíbulas, formando así una serie de bordes cortantes zigzagueantes, como si fueran las cuchillas de unas tijeras con las que cortaban la carne en porciones pequeñas.



Imagen de Patriofelis ferox, uno de los primeros carnívoros del Eoceno (Wikimedia, GFDL 1.2)

Así, en esta época eocénica, de entre todos los carnívoros dominaron los creodontos, que precisamente significa "*dientes de carnicero*". Eran animales de Laurasia y ya habían emigrado a África a principios del Eoceno, en donde desarrollaron tamaños tremendos, apropiados para la caza de los grandes proboscideos. Más tarde, a principios del Mioceno, cuando África y Europa se habían juntado, hace unos 20 millones de años, recolonizarían su antigua patria, Eurasia.

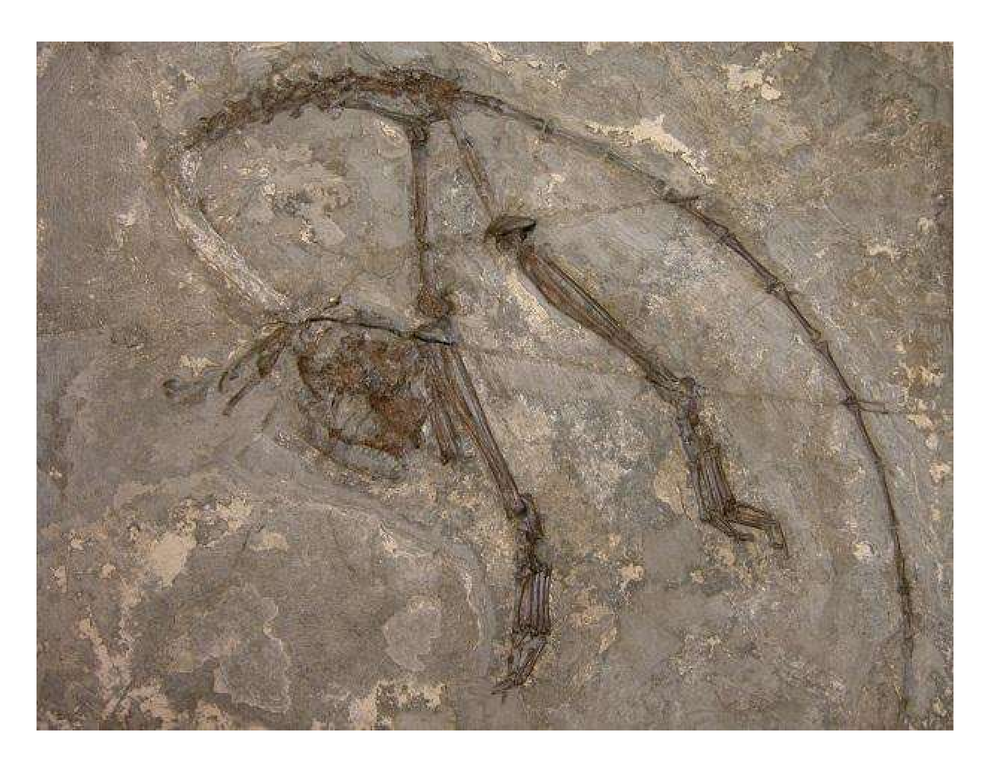
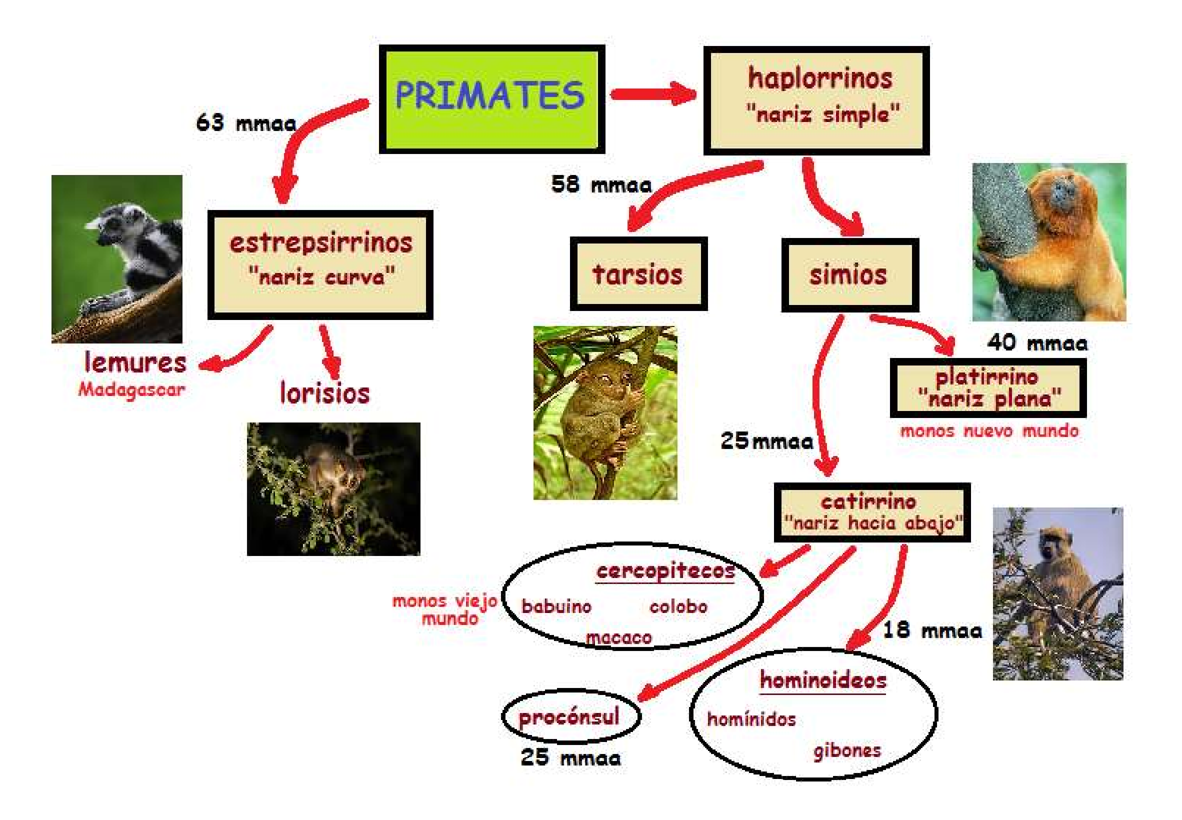


Imagen del fósil de Archicebus achilles descubierto en China. (Imagen: Xijun Ni, ver nota 6 a pie de capítulo, fair use)

También fue una época de evolución para los **primates**, que tenían una estrecha relación de parentesco con aquellos arcaicos plesiadapiformes de Laurasia. El fósil más antiguo, de hace 55 millones de años, se ha encontrado en lo que fue el lecho de un lago, hoy situado cerca del río Yangtze, en la actual provincia china de Hubei. Se trata de *Archicebus achilles* y corresponde a la rama filogenética de los tarsios, que apareció al poco tiempo de separarse esta rama de la de los antropoides. *Archicebus* difiere absolutamente de cualquier primate conocido. Realmente tiene unos pies de mono,

las extremidades y dientes de un primitivo primate y el cráneo asombrósamente pequeño, adecuado a su pequeño tamaño: unos 30 gramos cuando adulto.[6]

Las primeras migraciones de los primates más ancestrales se produjeron entre los continentes boreales. Un estudio [7] hecho público en 2006, basado en análisis isotópicos del carbono sobre fósiles del primate *Teilhardina*, parece asegurar que este animal se originó en Asia hace más de 50 millones de años, y que en un corto lapso de tiempo de 25 mil años migró primero a Europa y luego a Norteamérica.



Árbol filogenético de los primates, con la estimación de la época en que se desgaja cada rama. La datación temporal está sometida a discusión como el hecho de que algunos paleontólogos afirman que Procónsul sería el primer hominoideo

Y luego… ¿qué pasó? Realmente hay un vacío en el registro fósil entre estos antiguos animales del hemisferio norte y los primates más modernos, cuyos antepasados se han hallado en Asia y África.

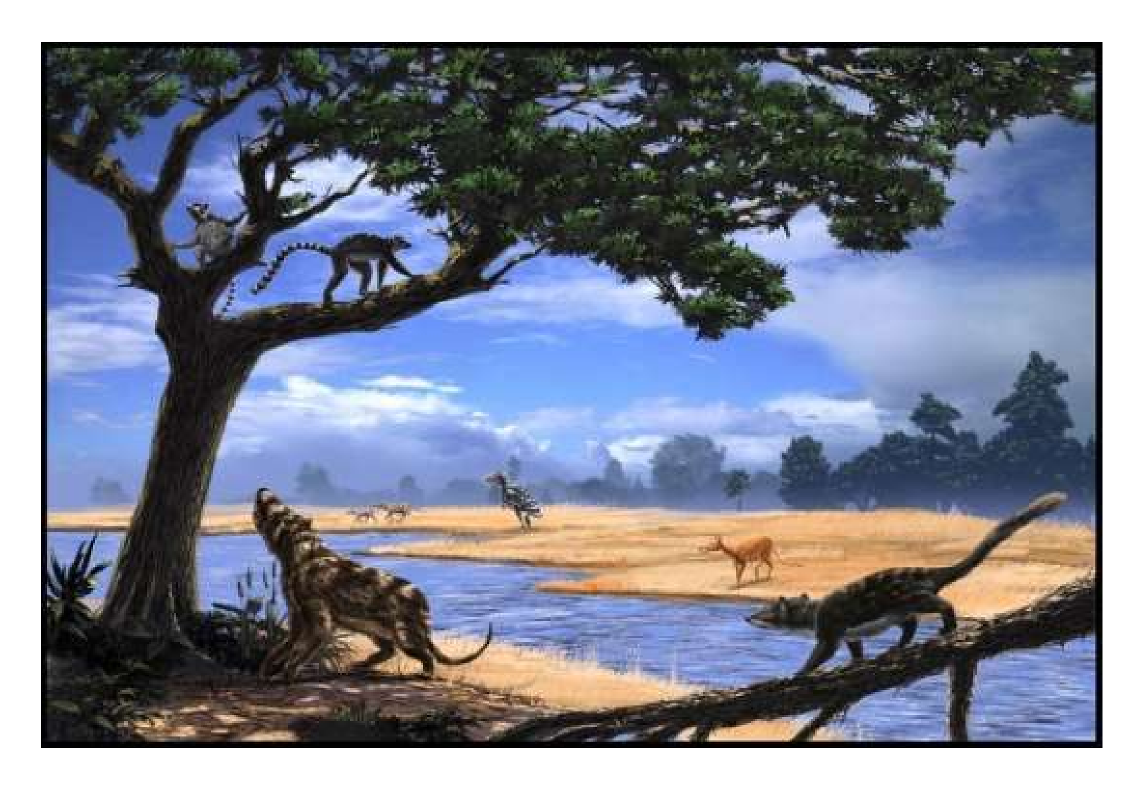
Posiblemente una población inicial emigró al continente negro extinguiéndose con posterioridad de los territorios euroamericanos de partida como consecuencia de la "Gran Ruptura", acontecimiento biogeológico del que hablaremos en un capítulo posterior. Ya en África, los emigrantes originaron más tarde la rama de los simiformes, produciéndose posteriormente su especiación -aparición de sus especies biológicas- en tres territorios muy separados: los sudamericanos Platirrinos, monos de "*nariz plana*" o "*monos del nuevo mundo*" hace unos 40 millones de años; los extintos asiáticos Eosímidos; y los africanos Catarrinos, los monos de "*nariz hacia abajo*" o "*monos del viejo mundo*", 15 millones de años después.

Se ha estudiado el salto de los simios de África a Sudamérica siguiendo las secuencias mitocondriales, y parece ser que se produjo en un rango de entre hace 43 y 35 millones de años. De hecho el fósil sudamericano más antiguo conocido [8] data de hace 35 millones de años y presenta más semblanzas filogenéticas con especies africanas del Eoceno que con fósiles más modernos de especies del propio continente.

Debido a la deriva continental hacía poco que se había formado el océano Atlántico, por lo que aún no tenía el ancho actual y seguramente estaría lleno de islas recién creadas por la dorsal atlántica. Estas islas serían cada vez más abundantes como consecuencia del progresivo descenso del nivel del mar que iba siguiendo el ritmo de crecimiento de los hielos en la Antártida. Es probable que los primates atravesaran el océano Atlántico saltando de isla en isla hasta América del Sur. O bien haciendo "rafting", de acuerdo a lo que dicen algunas investigaciones que sugieren que un primate pequeño de un kilogramo podría sobrevivir en una balsa de vegetación durante trece días. Teniendo en cuenta la velocidad del viento y las corrientes, pudo ser un tiempo suficiente como para realizar el viaje a través del canal que separaba a los dos continentes.[9]

La emigración al norte de los catarrinos desde África para colonizar de nuevo Europa y Asia se produjo mucho más tarde, alrededor de hace 20 millones de años.

Vamos a acabar el capítulo dedicado al Eoceno con el recurso que hemos empleado otras veces a lo largo de este libro. Con una imagen que nos permitirá rememorar la aventura que hemos vivido. Las praderas avanzando, los ungulados aprovechando esta nueva oportunidad en Eurasia mientras que en África los afroterios vegetarianos hacían lo mismo. A su estela comenzaban a medrar los nuevos carnívoros, mientras que los primates hacían sus primeros pinitos arbóreos. Los roedores ya mostraban con su expansión y afanes viajeros las inquietudes que hoy suponemos en ellos. Los pájaros seguían creciendo en número y formas, mientras en el agua los peces teleósteos hacían lo mismo. Todo ello lo podemos imaginar al ver el siguiente paisaje ideado y dibujado por Alain Bénétteau.



Paisaje del Eoceno (Ideado por el dibujante Alain Beneteau, fair use)

En esta imagen parece ya intuirse a la derecha unas nubes frías que amenazan nieve. El clima estaba realmente cambiando. En el capítulo siguiente continuaremos la historia atravesando momentos realmente gélidos. La vida se hace más dura, pero igual de irreductible que hasta ahora.

NOTAS DEL CAPÍTULO 49:

1. "*Cenozoic climate change influences mammalian evolutionary dynamics*", Borja Figueirido et al., artículo de la revista PNAS (diciembre de 2011) en donde se explica esta relación climática.
2. "*Major evolutionary transitions in ant agriculture*", Ted R. Schultz y Seán G. Brady. Ver en esta publicación de PNAS de abril de 2008 el estudio relacionado sobre la agricultura de las hormigas.
3. "*From Land to Water: the Origin of Whales, Dolphins, and Porpoises*", Thewissen, J.G.M., Cooper, L.N., George, J.C. et al. Evo Edu Outreach (2009). Podéis leer más sobre el tema en este artículo de la revista Evolution: Education and Outreach de junio de 2009.
4. En este artículo encontraréis la reseña sobre la evolución de las focas. "*A semi-aquatic Arctic mammalian carnivore from the Miocene epoch and origin of Pinnipedia*", Natalia Rybczynski et al. Publicado en la revista Nature de abril de 2009.
5. "*Middle Eocene rodents from Peruvian Amazonia reveal the pattern and timing of caviomorph origins and biogeography*", Pierre-Olivier Antoine et al. Para mayor información acudir a la web Proceedings of the Royal Society, de octubre 2011.
6. "*Oldest Primate Fossil Skeleton Found: Archicebus Achilles Could Shine Light On Human Evolution*". En la web de International Business Times de junio de 2013 podéis leer más sobre *Archicebus achilles.*

7. "*Calentamiento global de tiempos remotos dispersó a primates primitivos*". Podéis encontrar el artículo en la web de la Universidad de Michigan, julio 2006.

8. "*Eocene primates of South America and the African origins of New World monkeys*", Mariano Bond et al. Más detalles en esta publicación de la revista Nature de febrero de 2015.

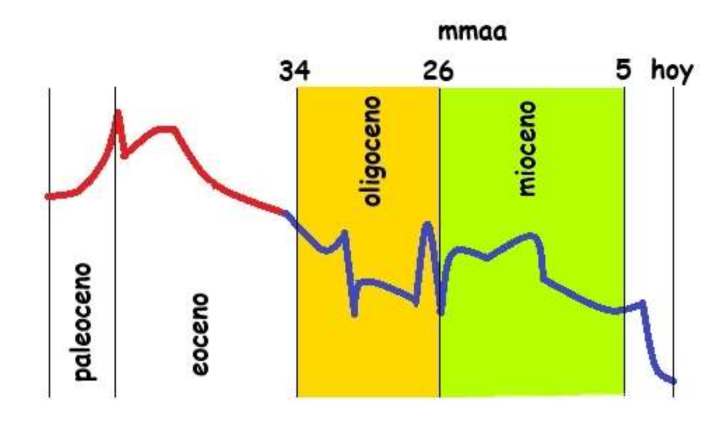
9. "The origin of platyrrhines: An evaluation of the Antarctic scenario and the floating island model", Alain Houle.

10. "*The origin of platyrrhines: An evaluation of the Antarctic scenario and the floating island model*", Alain Houle, un interesante estudio aparecido en la publicación Physical Anthropology de julio de 1999 sobre la posibilidad de viajar sobre balsas entre África y América.

50. Oligoceno y Mioceno

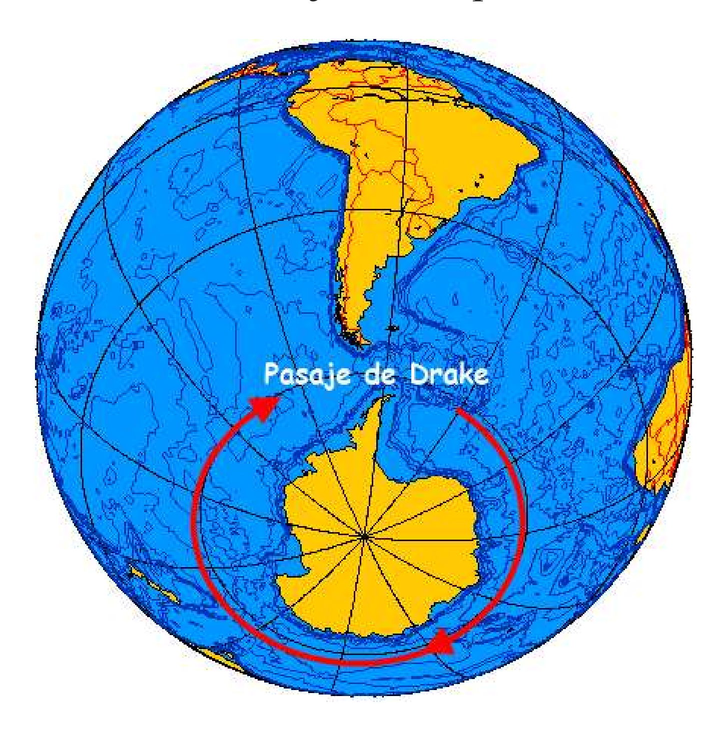
A través de los últimos capítulos hemos asistido a la hecatombe aniquiladora de finales del Cretácico, a cómo la Vida se fue reponiendo hasta llegar a una situación de nuevo equilibrio y de cómo esto debió ser el acicate para una nueva época de diversificación y enriquecimiento de formas. La "anécdota" se tomó su tiempo: 34 millones de años. Pero toda carrera conlleva un cierto agotamiento, y esto es lo que pasó en la nueva época que nos disponemos a explorar: el Oligoceno. Precisamente este nombre, "*Oligo-ceno(zoico)*", quiere decir "*poca nueva vida*". Como queriendo avisar: la capacidad inventiva se ha agotado. Y aún hubo más: la época que siguió se la nombró Mioceno, un intento de enfatizar aún más con un mensaje de "menos nueva (vida)" ["*Mio-ceno(zoico)*"]. Intuimos claramente que la caída generalizada de la temperatura debió ser quien perfilaba el nivel de actividad de la biosfera.[1]

Por eso vamos a utilizar de nuevo nuestro gráfico favorito para ubicarnos en el tiempo. Hemos entrado ya en regiones de un frío color azul.



El Oligoceno

Sabíamos por lo dicho en el capítulo 47 que titulamos como "*Comienza el Terciario*" que, aproximadamente un poco antes de iniciarse el Oligoceno, en el sur, la Antártida se estaba separando de Sudamérica, dejando abierto lo que hoy conocemos como el Pasaje de Drake. Poco antes lo había hecho de Australia, por lo que quedó completamente abierta una franja circumpolar de mar.



Proyección ortográfica hemisférica centrada en el actual Pasaje de Drake (Wikimedia, dominio público)

Ello permitió que las corrientes marinas pudieran cerrar su recorrido circular aislando al continente antártico, que ya no pudo atemperar con las corrientes que descendían desde el trópico las temperaturas frías del invierno polar, comenzando a cubrirse con un casquete de hielo. La consecuencia fue un enfriamiento global del planeta debida al menos a un doble motivo: Por un lado, el mayor frío de la Antártida incrementó el efecto sumidero del calor solar recogido en latitudes más bajas -en este caso más al norte-, por lo que se alteraron la circulación atmosférica y las corrientes termohalinas [2] marinas que repartían por el planeta el frío del sur; y por el otro, por una

causa que ya vimos en su momento: el hielo tiene mayor albedo, por lo que refleja más energía solar al espacio, reduciendo la temperatura. El consiguiente enfriamiento de las aguas provocó el que muchas especies que habitaban aguas cálidas desaparecieran, dando lugar a una fauna muy pobremente diversificada.

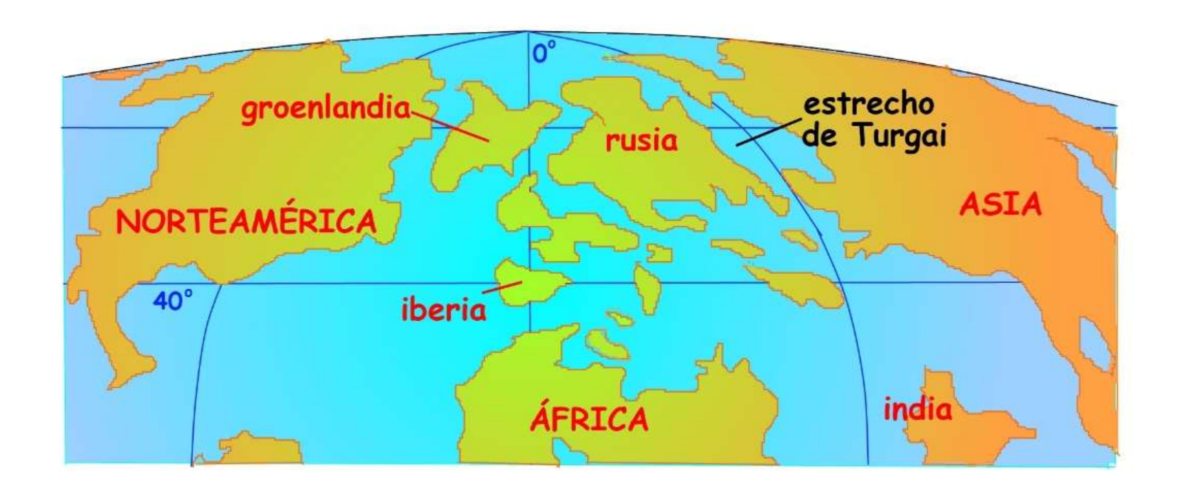
Durante esta época fría continuó la regresión de los bosques tropicales de la franja ecuatorial, en donde fueron sustituidos por árboles menos sensibles a los cambios de temperatura, y se consolidó la expansión definitiva de los pastizales por América, Europa, Asia y África. El éxito de las herbáceas estribaba en que su crecimiento era constante, no paraba, lo que le permitía invadir con gran éxito nuevas tierras interiores partiendo de sus orígenes en las riberas de las corrientes de agua. Una vez conseguida la especial simbiosis con los animales pacedores -los comedores de pastos- que con la ingestión eliminaban las plantas competidoras y a la vez ayudaban a esparcir sus semillas a través de los excrementos, las plantas herbáceas se diseminaron sobre inmensas extensiones de territorio para formar las praderas.

Es evidente que el clima estaba jugando con los habitantes del planeta. Pero no toda la presión evolutiva del momento debe ser achacada a esta circunstancia.

Hace 34 millones de años se produjo lo que se conoce en el territorio europeo como la "Gran Ruptura", o como el "Remodelado Mongol" en el asiático. Está conceptuado como un episodio más de extinción de especies, mucho menos grave que las cinco que ya conocemos de anteriores capítulos, aunque realmente se trató de una reconfiguración en la fauna europea. La "Gran Ruptura" se caracteriza por el cambio en las poblaciones de diversas especies provocado principalmente por dos circunstancias relacionadas con el estrecho de Turgai.

En el mapa siguiente podemos ver la situación de este estrecho en una época anterior a la que estamos estudiando. No importa el año

exacto, pero aproximadamente representa la distribución geográfica de territorios hace unos 55 millones de años. Turgai dividía y fragmentaba la franja de tierras entre lo que actualmente son Europa y Asia, dejando una serie de pequeños enclaves que se iban modificando con el tiempo. Esta situación geográfica se mantuvo hasta inicios del Oligoceno, hace 34 millones de años, que es cuando se unen definitivamente los dos continentes desapareciendo la configuración de archipiélagos dominante hasta entonces. Durante las fases iniciales de desmembración y configuración cambiante, las pequeñas poblaciones que quedaban aisladas e incomunicadas entre ellas experimentaban procesos de nueva especiación -por el que se generan nuevas especies a partir de otras-.



Configuración de los territorios europeos durante el Eoceno. El estrecho de Turgai se cerró en la frontera con el Oligoceno

Así que el caldo de cultivo era muy variado cuando se unieron los dos continentes tras el cierre definitivo del estrecho de Turgai. Esto último permitió que las migraciones de animales entre ambos territorios fueran masivas. Gracias a todo ello los mamíferos sufrieron una gran renovación, siendo este periodo de absoluta transición entre las formas antiguas y las nuevas. Las familias endémicas de Europa fueron sustituidas por inmigrantes asiáticas, extinguiéndose así más de la mitad de los mamíferos europeos, como sucedió con sus primates, y afectando de este modo al resto de la flora y fauna. La familia del caballo desapareció de Eurasia, aunque

se mantuvo firme en Norteamérica. Por contra, aparecieron por primera vez nuevas familias como la de los erizos o la de los rinocerontes modernos. Mientras, en el resto de órdenes europeos, roedores y ungulados, cambiaron sus especies dominantes, algo similar a lo que sucedería mucho más tarde en América con la aparición del istmo de Panamá.



Mesohippus bairdi, un caballo norteaméricano de hace 40 millones de años, tridáctilo y de 55 centímetros de alto (Wikimedia, dominio público)

En este entorno de modificaciones de hábitats y de extensión de los herbazales, los ungulados de doble pezuña llegaron a ser la especie herbívora de tamaño medio más abundante. Ya sabemos por lo que decíamos en el capítulo 49 que en el Eoceno algunos habían desarrollado el *rumen*, un estómago complejo, situado en el tracto digestivo anterior, que ayudaba en la digestión de la celulosa. Eso era así gracias a que en él se encontraban numerosos microorganismo anaeróbicos que pre-digerían esa biomolécula, transformándola en azúcares asimilables por los rumiantes. De allí lo regurgitaban de nuevo a la boca donde acababa la masticación. Esto supuso para estos animales una gran ventaja que les permitía optimizar el uso de una dieta fibrosa, cosa que se iba haciendo cada

vez más importante a medida que el mundo siguió haciéndose más seco y frío.

En Sudamérica, que estaba físicamente separada del resto de las tierras, durante el Eoceno evolucionó una fauna muy exclusiva de este continente, entre la que se encontraban marsupiales, ungulados y los famosos xenartros, que incluyen a los osos hormigueros, armadillos y perezosos. Muchas de esas criaturas constituyen un claro caso de evolución convergente, ya que prácticamente su diversificación fue similar a la de la fauna mamífera de otros continentes: en nichos semejantes de territorios distintos evolucionaron de forma totalmente independiente fenotipos animales también semejantes. Es curioso el constatar que la fauna inicial de Sudamérica es muy parecida a la de Australia, y esto es debido a que durante muchos millones de años la Antártida hizo de puente entre ambos continentes.



Xenartros, típica fauna sudamericana (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

No podemos olvidar aquí lo adelantado en el capítulo anterior referente a cómo hace unos 25 millones de años, en latitudes australes, se consumó el tercer retorno mamífero al agua, cuando unos carnívoros con la forma y costumbres de una nutria iniciaron el camino de los pinípedos: focas, morsas, lobos de mar…

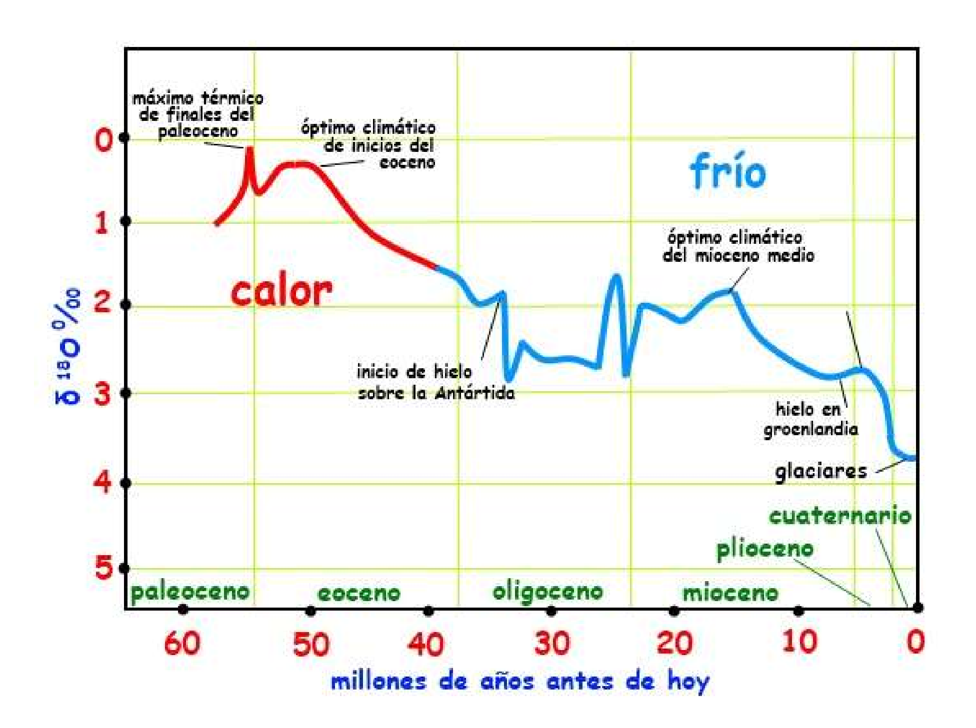
En resumen, el fin del Oligoceno nos deja una imagen nueva del planeta, en donde los cambios climáticos están induciendo también modificaciones en la distribución de los vegetales: los grandes ejemplares de plantas parecen huir de las latitudes altas para refugiarse en zonas más templadas. En el proceso comenzaron a triunfar las plantas herbáceas, circunstancia que aprovecharon los ungulados para consolidar su expansión. Fue una época que podríamos definir casi como de continuista en todos los biotopos, durante la cual se produjo un importante baile de especies apareciendo ya las más modernas en un marco de estabilidad en los planes generales de organización de las formas corporales.

El Mioceno

Nos encontramos ahora en las puertas de la siguiente época, el Mioceno. Año 26 millones antes de hoy. La idea general es la que comentamos al inicio de este capítulo: La palabra "*Mioceno*" quiere decir, en pocas palabras, que esta época no fue muy generosa en la generación de nuevos fenotipos animales.

En aquellos momentos los continentes australes seguían una deriva norte. La India continuaba presionando sobre Asia, lo que levantaba el Himalaya y la meseta tibetana. África por fin choca con Europa, elevando la cadena de montañas alpinas desde el Atlas hasta el Cáucaso, e incluso las cordilleras irano-iraquís más al este. Sudamérica aún no había llegado a unirse con su continente hermano del norte, aunque la presión producida por la colisión entre su borde oeste y la placa pacífica estaba conformando a los Andes. Al sur, la Antártida quedaba cada vez más aislada por los mares circumpolares y cubierta de hielos. Las temperaturas, que experimentaron un cierto

incremento hace 25 millones de años, vuelven a la senda descendente, de forma que comienza a acumularse hielo en altas latitudes del hemisferio norte como en Groenlandia, favorecido además, como sabemos del capítulo 47, por el progresivo cerramiento del "istmo de Panamá".



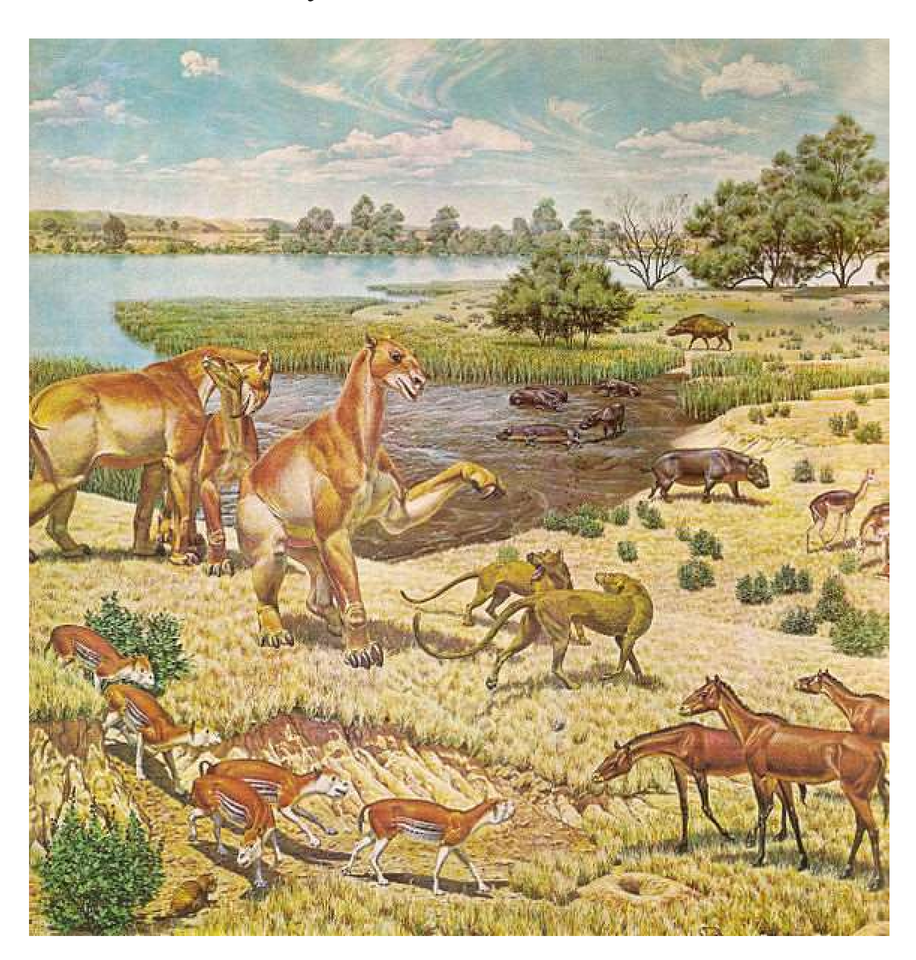
La tendencia climática general en el planeta fue hacia una creciente aridez, ya que el enfriamiento global de la atmósfera hizo que disminuyera su capacidad para retener la humedad. Las consecuencias para el mundo vegetal fueron evidentes, puesto que desaparecieron los bosques húmedos, entre otros los del este de África. En aquellos momentos se elevaba la zona ecuato-oriental de este continente, subiendo su nivel sobre el del mar. Las causas eran las fuerzas geológicas que abrían el rift africano acompañado de un importante vulcanismo que formó tremendas montañas de más de 5.000 metros de altura como el monte Kenia, el Stanley o el Kilimanjaro.

Como veremos en capítulos posteriores, ambas circunstancias, aridez climática y elevación geológica del terreno, fueron esenciales

en el camino hacia la bipedestación de los simios. Al retirarse los bosques las praderas siguieron extendiéndose, debido a su mayor capacidad de recuperación tras una sequía, de forma que a esta época se le puede llamar también la "*edad de las hierbas*", que continuaron apoyadas en la coevolución con los grandes herbívoros como los rumiantes. Las herbáceas jugaban con ventaja, ya que sus organismos apenas precisan lignina, lo que las hace virtualmente plantas sin leña –aunque algunas especies sí tienen tallos fibrosos y mineralizados- y que por su pequeño talle se sustentan gracias a la presión hidrostática en el interior de sus células. La mayoría de estas plantas son gramíneas, las cuales suelen desarrollar una modalidad de fotosíntesis en donde interviene para la fijación del CO_2 una molécula con cuatro átomos de carbono. Por eso se las llama plantas C4 en contraposición a las C3, que son el resto. Estas últimas viven perfectamente cuando las condiciones de humedad y temperatura son buenas, aunque no soportan bien bajas concentraciones atmosféricas de CO_2, cosa que sí hacen las plantas C4. Estas circunstancias comenzaron a ser las que realmente existían a partir de hace unos 30 millones de años. De ahí la gran expansión de las gramíneas en las llanuras centrales norteamericanas y de África durante este periodo, las cuales iban ocupando los nichos ecológicos de donde se retiraban los bosques húmedos tropicales castigados por un clima cada vez más frío y seco. Un *biotopo favorable* combinado con su *simpleza estructural* que les permite un crecimiento muy rápido, reforzado todo ello por una eficiente *estrategia de fecundación* y dispersión de sus semillas, como es característica de las plantas de flores compuestas, y acompañado por una exitosa *asociación con los animales herbívoros* junto a los que iban evolucionando, todo ello confirió a las herbáceas el tremendo éxito que tuvieron en sus inicios.

Tanto la fauna marina de la época como la continental presentaban ya un aspecto moderno, de forma que a finales del Mioceno se podían encontrar todas o casi todas las familias actuales. El gran éxito y avance de las gramíneas, plantas ideales como forraje, contribuyó al auge de los animales herbívoros existentes, que

vivieron un momento de esplendor: caballos, rumiantes, rinocerontes, elefantes… se fueron diversificando para ir decayendo a partir de finales de la época hasta la situación actual. También fue notable el auge de animales considerados menores como las ranas, serpientes, roedores o paseriformes. Aparecen en Norteamérica los modernos osos hace unos 20 millones de años a partir de animales del género extinto *Ursavus*, que habitaban en Asia y que emigraron hacia América por el estrecho de Bering a mediados del Mioceno. Mientras, los marsupiales se retiraron definitivamente del hemisferio norte, quedando desde entonces definitivamente ubicados en Sudamérica y Australia.



Representación de un posible paisaje norteamericano de hace 15 millones de años. El clima, aunque frío y seco, no lo era tanto como hoy en día (Mural del Instituto Smithsoniano, Washington, Wikipedia, dominio público)

Después de lo leído hasta ahora dejemos volar de nuevo la imaginación contemplando lo que bien puede parecerse a un antiguo paisaje del Mioceno. La hora: mediodía. En la figuración anterior se puede apreciar el triunfo de las herbáceas. La panorámica claramente transmite la sensación de un clima cálido y seco, a pesar del inmenso río que transcurre plácido por el fondo alimentando con su humedad a grandes angiospermas. Al fondo, un solitario *Daeodon*, el "*cerdo terrible*", un artiodáctilo de gran tamaño que pesaba casi una tonelada. Posiblemente andaba buscando algún resto óseo para extraer la médula con sus potentes dientes. En el agua, una familia de *Lartetotherium* combatiendo el calor y las picaduras de los insectos en el fango de la ribera. Uno de ellos ha salido a comer la hierba de la pradera, alimento predilecto de este ungulado de pezuña única, más parecido a un hipopótamo que a un rinoceronte, que es lo que realmente es. Junto a él, unos tranquilos *Megatylopus*, unos camellos de tamaño medio, ya que pesaban entre 100 y 200 kilos, que con su largo cuello ramoneaban las hojas de los árboles, a medio camino de ser una jirafa.

En primer plano domina una pareja de gigantescos *Indriocotheriinae* con su cría. No saben estos rinocerontes ancestrales que son unos de los mamíferos terrestres más grandes que han existido y que van a existir, mayores que un mamut, con sus casi seis metros de alto y 20 toneladas de peso. Les había costado mucho conseguir al pequeño, casi dos años de gestación y un año de lactancia para después pasar a comer hojas que arrancaban de los árboles con sus dos incisivos superiores, de ahí el cariñoso cuidado que se aprecia. Tremendos, pero inofensivos. Por eso sólo despiertan un aviso, más bien fruto de la prevención, de la pareja de valientes *Hesperocyoninae*, unos cánidos que debieron ser de los primeros que surgieron y se diversificaron en Norteamérica.

En primer plano una jauría de *Borophagus*, otros cánidos carnívoros que depredaban équidos, roedores y otras presas de pequeño tamaño. En este caso van a por los *Miohippus* de la derecha. Debían volver de una cacería, ahítos, ya que el primer encuentro con los pequeños

caballos no parece amenazador. Un joven cánido de la jauría se entretiene ante la vista de un *Cynomys,* ancestro del perrillo de las praderas que, en un momento de despiste, se ha alejado de su madriguera arriesgando gravemente su piel.

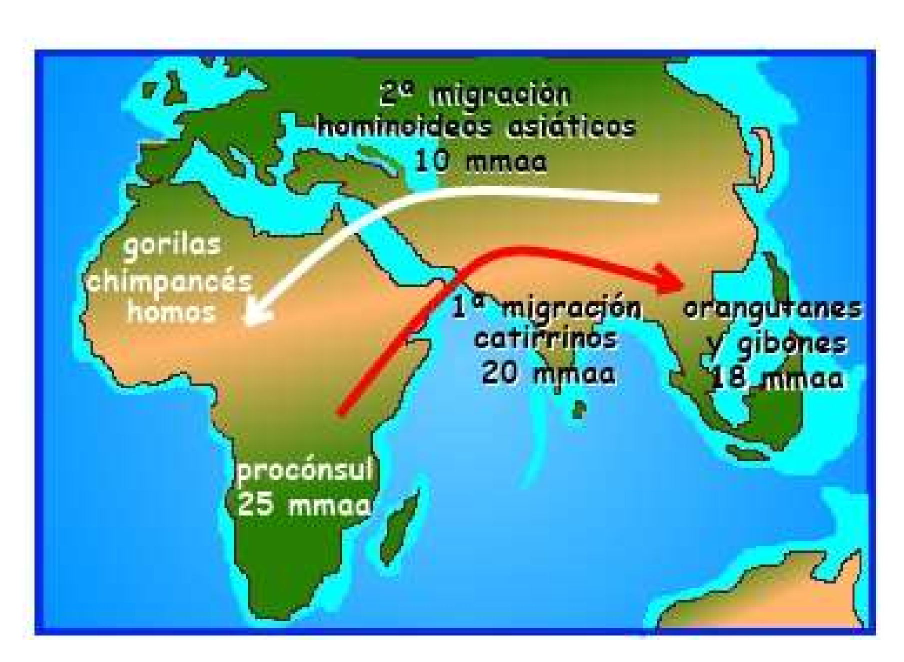
Dejemos nuestra plácida crónica para continuar el viaje por la historia, ya casi moderna, de la biosfera.

En esta época, el Mioceno, hubo una gran expansión evolutiva de los simios, que llegaron a sumar unas cien especies en todo el mundo. Ya conocíamos a los catarrinos de África, entre los que se cree que pudiera encontrarse por primera vez alguna característica antropomórfica, y a sus emigrantes transformados en platirrinos sudamericanos. Hace unos 20 millones de años se produce un nuevo éxodo, ahora a la inversa, en la que vuelven los monos catarrinos a Asia una vez que África y Europa se unieran geográficamente por Arabia. Los miembros de esta migración se extendieron sobre gran parte del territorio, variando mucho en tamaño, dieta y anatomía, formando diversas familias de las que se han encontrado fósiles tanto en Europa como en Pakistán y en China. La riqueza de la diversidad de estos primates catarrinos en Eurasia se debió a que el clima, más benigno durante esta época antes del descenso definitivo de las temperaturas, permitía que los bosques que sustentaban y cobijaban a estos animales estuvieran por entonces muy extendidos en aquel continente.

Y la misma benignidad de las temperaturas hizo que tuviera lugar hace unos 18 millones de años, probablemente en Asia, el inicio de la familia de los hominoideos, de los que aún a día de hoy mantienen allí como representantes a los orangutanes y gibones.

Los miembros de la nueva familia de primates hominoideos tienen como característica particular, que los diferencia del resto de los monos, el que no tienen cola. Se cree que perdieron este apéndice o, mejor, lo redujeron formando el cóccix, fusionando las vértebras de la cola residual al adoptar el bipedismo como *otra* modalidad de

marcha, complementaria a la habitual locomoción arbórea por braquiación -colgado de las ramas por los brazos-. A dos patas, una cola resultaba un gran inconveniente para su movilidad. Los individuos sin ella debieron tener una cierta ventaja evolutiva.



Migraciones de los Hominoideos según datos filogenéticos y estudios de la bióloga Caro-Beth Stewart y el antropólogo Todd R. Disotell (ver nota a pie 2 de capítulo, fair use)

Y de nuevo una nueva emigración hacia el sur. Hace unos diez millones de años una población de estos últimos hominoideos asiáticos usaron posiblemente de nuevo a Arabia como puente para regresar a su África original. Algunos paleontólogos afinan más la historia, ya que según ellos el estudio del registro fósil sugiere que los humanos y los grandes simios actuales descienden de dos antiguos linajes de hominoideos de Eurasia: el asiático *Sivapithecus,* antecesor de los orangutanes, y el europeo *Dryopithecus*, que lo es de los gorilas, chimpancés y *homos*.

A partir de estos últimos inmigrantes, una vez llegados al continente africano, se desarrollaron los modernos homínidos: los *gorilas*, que se separaron de la rama hace unos 9 millones de años, los *chimpancés* conjuntamente con los *bonobos,* que lo hicieron hace

unos seis, y finalmente los *homos*. La escasa evidencia fósil no permite asegurar qué tipo de mono o monos contribuyeron a la moderna familia homínida, aunque la evidencia molecular indica que estos pioneros vivieron entre hace 15 y 12 millones de años. El homínido fósil más antiguo encontrado hasta la fecha se descubrió al norte de África y data de hace entre 6 y 7 millones de años.



Cráneo de Sahelanthropus tchadensis, fósil de uno de los primeros homínidos que se conocen (6 a 7 millones de años) encontrado en el Chad (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Parece un poco complicada esta aventura de idas y venidas que los simios catarrinos y hominoideos realizaron entre Asia y África. Sin embargo ésta es la historia que proponen la bióloga Caro-Beth Stewart y el antropólogo Todd R. Disotell, que afirman en uno de sus estudios (1998) [3] que la hipótesis de los orígenes asiáticos de los hominoideos sería la más plausible, es decir, la más fácilmente explicable a la luz de los fósiles conocidos, y por tanto la más probable, más que la hipótesis asumida durante mucho tiempo por los científicos que pivotaba sobre el origen africano de los hominoideos.

La opinión del profesor en antropología de la Universidad de Toronto David R. Begun,[4] una primera autoridad mundial en esta materia, refuerza la tesis. Él piensa que el importante cuerpo de evidencias fósiles acumuladas en los últimos años indica sin lugar a dudas el que la patria chica de los grandes simios y de los humanos fue Eurasia a pesar de que los primeros simios catarrinos aparecieran por primera vez en África.

Pero, como todo en el camino del conocimiento científico, no debe extrañar que este tema siga estando sometido a estudio, discusión y variadas opiniones. Y como botón de muestra lo que sigue, una variante más, ya que también hay expertos que apuestan por mantener *un origen anterior* y en África, al considerar ya a los individuos del género *Proconsul* como los más antiguos representantes de los hominoideos. Se le considera un antropoide muy primitivo, que ya presentaban rasgos de los hominoideos como la ausencia de cola o tener el pulgar opuesto a los otros dedos, pero manteniendo aún algunos atributos primitivos de los monos y que eran ya del tamaño de un gorila hembra. El *Proconsul* vivió antes de la separación del linaje de los gibones, en un periodo estimado entre hace 25 y 15 millones de años.

Mientras la historia de los primates tejía y destejía su destino, el continente sudamericano se aproximaba a su hermano del hemisferio septentrional. Cada vez había más islas entre los dos territorios, posiblemente de carácter volcánico consecuencia de la presión entre las placas. Se estaba creando una pasarela por la que la fauna traspasaba de un lado a otro sus genotipos. Los primeros intercambios entre las dos américas se produjeron hace 9 millones de años, cuando algunos carnívoros caninos del norte dieron el salto con un efecto devastador sobre los animales autóctonos del sur. Este puente de islas también permitió el cruce de roedores, megaterios –un tipo de perezosos terrestres ya extintos- y aves del terror -también desaparecidas- desde Sudamérica hacia Norteamérica y las modernas Antillas, casi dos millones de años antes de la formación de Centroamérica.

Y esto es lo que estudiaremos en el siguiente capítulo, tras cerrar el periodo Mioceno en fechas de hace 5 millones de años.

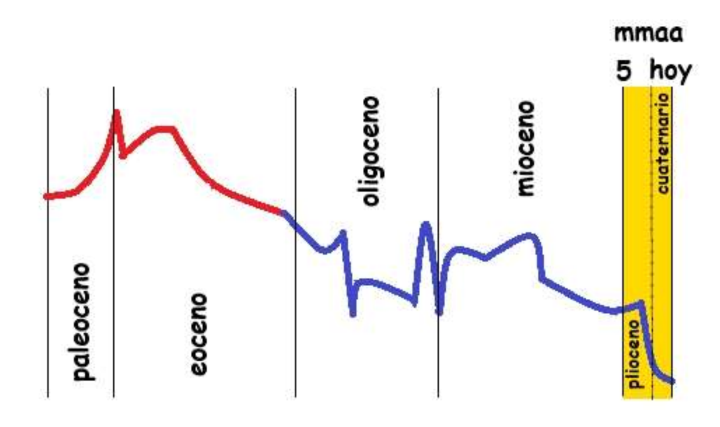
NOTAS DEL CAPÍTULO 50:

1. Un mayor detalle de esta correlación climática la encontramos en un artículo, "*Cenozoic climate change influences mammalian evolutionary dynamics*", Borja Figueirido et al., publicado por PNAS de enero de 2012.
2. En oceanografía física se denomina **circulación termohalina** a una parte de la circulación oceánica a gran escala que es determinada por los gradientes de densidad globales producto del calor en la superficie y los flujos de agua dulce. Es muy importante por su significativa participación en el flujo neto de calor desde las regiones tropicales hacia las polares y su influencia sobre el clima terrestre. El adjetivo termohalino deriva de las palabras griegas θερμος [thermos] "*caliente*" que hace referencia a la temperatura y άλος [halos] "*de la sal*" que hace referencia al contenido de sal, factores que juntos determinan la densidad del agua de mar.
3. En este artículo, "*Human Ancestors Went Out Of Africa And Then Came Back: Researchers Propose Controversial New Model For Evolution Of Humans And Apes*", aparecido en ScienceDaily de agosto de 1998 podréis encontrar un mayor detalle de estos estudios.
4. Opinión recogida en este artículo, "*Planet of the apes*", Davis R. Begun, publicado en Scientific American de agosto de 2003.

51. Los últimos 5 millones de años

En el capítulo que antecede vimos cómo el proceso de riqueza en la diversificación de plantas y animales iba ralentizándose en lo que parecía una transformación condicionada en gran medida por el enfriamiento global del planeta.[1] Las épocas de la "*poca vida nueva*" seguida de la "*aún menos vida nueva*", Oligoceno y Mioceno respectivamente, nos han dejado al toro en posición para culminar el último tercio taurino que sentimentalmente apreciamos como "el nuestro". Vislumbramos el final del túnel de esta Biografía de la Vida ya que nos quedan tan sólo contemplar los últimos 5 millones de años de la existencia de nuestro planeta, un poco más del 1‰ de nuestros anales. A esto nos dedicaremos empezando con este capítulo.

Comienzan por tanto los últimos cinco millones de esta larga historia de la Vida, que se desarrollaran a caballo casi al 50/50 entre la última época del Terciario, el Plioceno, y el Cuaternario. Como colofón de nuestras inquietudes etimológicas, acabaremos diciendo que el significado de *Plioceno* es algo así como "*continuidad en la*(s formas de la) *nueva vida*", Plio-ceno(zoico).



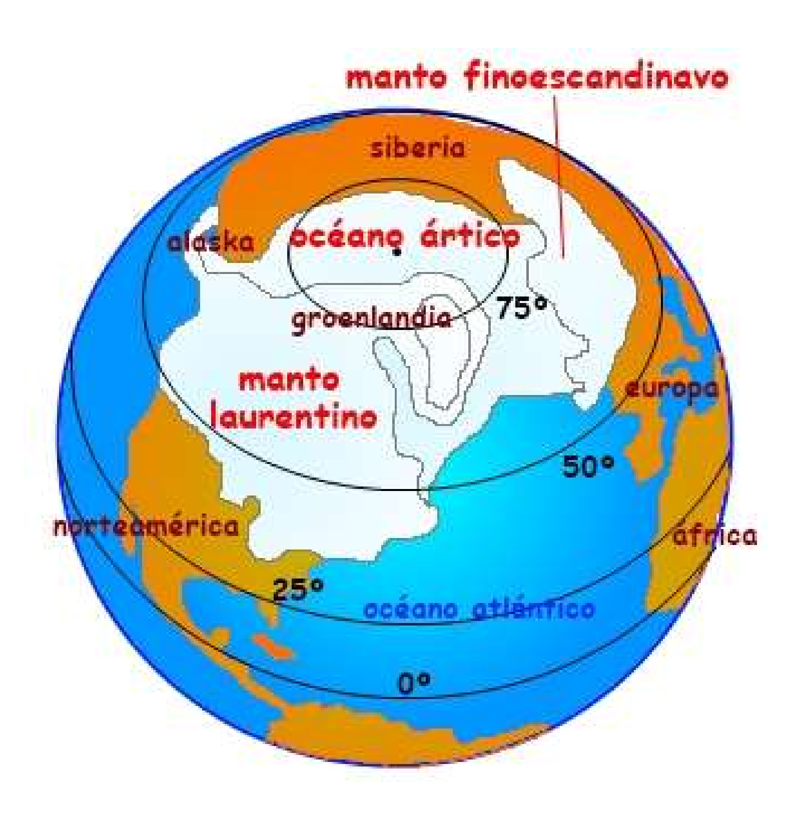
Se inicia esta época final con un repunte de las temperaturas, que subieron posiblemente unos 3ºC, repunte que hizo disminuir los hielos sobre las tierras y elevar el mar unos 60 metros. Los perfiles continentales eran semejantes a los actuales, quizás desenfocados unos cien o doscientos kilómetros con respecto a los contornos de hoy.

La recuperación de las temperaturas hace que por última vez en su historia la Antártida se viera de nuevo libre de hielo, desarrollando por última vez una vegetación que formaban bosques de angiospermas semejantes a las hayas.

Pero hace tres millones de años aproximadamente se cerró definitivamente el istmo de Panamá, lo que lógicamente cambió la configuración de las corrientes oceánicas. Estos cambios en los flujos de la circulación termohalina facilitaron el enfriamiento del Ártico, que se cubrió de hielo favoreciendo un nuevo clima global "nevera", a la vez que ayudaron a la recuperación de los casquetes helados en la Antártida. Estos procesos geológico-climáticos ya se comentaron con un poco más de detalle en el anterior capítulo 47 que llamé "*Comienza el Terciario*".

La consecuencia es que hace 2,5 millones de años las temperaturas iniciaron una senda de franca regresión hacia el frío. Como un inciso, diremos que las fechas coinciden con la aparición del género *Homo*. Los procesos que habían condicionado la evolución y distribución de las plantas en los últimos millones de años, que ya conocemos de anteriores capítulos, reiniciaron su andadura. El clima frío y seco, con estacionalidades muy marcadas, volvió a premiar a las angiospermas caducifolias. Las coníferas también se las arreglaron bien, aunque sin poder soportar el ambiente extremo de las latitudes altas, por lo que tras el paréntesis de inicio de este periodo volvieron a ceder sitio a la tundra que se extendía sobre el permafrost, la capa permanentemente congelada en los niveles superficiales del suelo de las regiones muy frías. Las praderas siguieron prosperando y se diseminaron por todos los continentes a

excepción de la helada Antártida. Los bosques tropicales fueron arrinconados en una franja ecuatorial cada vez más estrecha. El clima de África se hizo más árido, posiblemente debido al enfriamiento del océano Atlántico y a la elevación del propio continente africano por causas relacionadas con la progresiva apertura del Gran Valle del Rift. Todo ello dificultaba la entrada de aire húmedo por el oeste del continente, lo que al final hizo que aparecieran en África zonas desérticas y grandes superficies de sabanas.



Extensión máxima de hielos en algún momento de los últimos 2,5 millones de años (A partir de "Historia del clima de la Tierra",[2] Antón Uriarte, fair use)

En el último millón de años las latitudes más elevadas del planeta se cubrieron con extensos mantos de hielo, especialmente en el hemisferio Norte. Se estima que durante la máxima extensión del periodo glaciar quedó ocupada por la capa de hielos una extensión equivalente al 30% de la superficie de las tierras emergidas de la actualidad. A lo largo de este periodo de intermitentes fluctuaciones

climáticas se vivieron hasta cuatro periodos glaciares importantes, interrumpidos por épocas en las que el clima se hacía más cálido. En aquellos periodos interglaciares se reducían las capas de hielo, produciéndose en consecuencia una elevación en el nivel de los mares que en algún caso pudo ser de hasta unos cien metros. Imaginad el estrés evolutivo al que la vida estaba sometida en aquellos años del Cuaternario.

El inicio del periodo que corresponde a los últimos cinco millones de años es considerado por muchos zoólogos como el **punto álgido** de la "**edad de los mamíferos**", caracterizándose prácticamente toda la época por la abundancia de grandes mamíferos, como el mamut, el reno, el oso polar, el rinoceronte lanudo… la mayoría de los cuales todavía viven hoy día.

A medida que el hielo avanzaba, los seres vivos emigraban hacia zonas más cálidas empujados por las barreras de los glaciares y en busca de alimentos. En Europa los mamíferos se vieron obligados a migrar hacia el sur, buscando refugio en los bosques de la península Ibérica, Italia o los países Balcánicos. Muchos de ellos, sobre todo los de gran tamaño como el mamut, el oso de las cavernas o el tigre dientes de sable, se extinguieron debido a que sus hábitats se restringieron bruscamente. En Norteamérica sucedió algo parecido desapareciendo también muchas especies de mamíferos como los de la familia de los camélidos, el tapir, el caballo y el yak.

Algo muy distinto sucedía más al sur. En las regiones cálidas de África y Asia, al no verse afectadas por las glaciaciones, la fauna no sufrió cambios bruscos. Es más, en latitudes próximas al ecuador aumentaron las lluvias, con lo que la vida vegetal y animal llegó a florecer en áreas del norte y el este de África que hoy son yermas y áridas. Hace unos 10.000 años el sur del Sahara se transformó en un paisaje lacustre similar al que hoy ofrecen ciertos parajes del actual Chad, en donde habitaban grandes ungulados y en donde el hombre practicaba sus cacerías.

Es en este último continente donde tuvo lugar el definitivo proceso evolutivo de los homínidos, que desarrolló diversas especies, desde los *australopitecinos* al *Homo habilis* y al *Homo erectus*, consideradas antepasados directos del *Homo sapiens*. En capítulos posteriores analizaremos esta evolución y las consecuencias que sobre ella tuvo la apertura del "Gran Valle del Rift".

Además de la presión climática a lo largo de estos geológicamente "cortos" cinco millones de años, ocurrieron también algunos cambios geográficos que influyeron grandemente en la evolución de la biosfera. Uno de ellos, que introdujimos en el capítulo anterior, fue la elevación de la zona ecuatorial al este de África debida al fuerte vulcanismo de hace 2,5 millones de años, lo que había provocado la creación de alturas superiores a los 5.000 metros como los montes Kenia y Kilimanjaro. Aquí trataremos además de otros dos cambios sumamente importantes como fueron, por un lado, el ya comentado cerramiento del Istmo de Panamá, hace 3 millones de años, que unió a los dos continentes americanos; y por el otro, el cerramiento del "Puente de Beringia" ocurrido hace unos 40.000 años, que fusionó por el norte a Asia con América permitiendo las migraciones entre ambos continentes.

El cierre definitivo del Istmo de Panamá permitió un intercambio faunístico entre América del norte y América del sur. Podemos imaginar la intensa corriente zoológica como una rápida incursión de individuos en busca de los nuevos habitats nunca conocidos. La fauna laurásica, del norte, compitiendo con los xenartros y los últimos emigrantes africanos de Sudamérica. Realmente debió ser un choque de trenes. Hacia el sur pasaron los ungulados – camélidos, venados, caballos-, los carnívoros –cánidos como el oso y felinos como el puma- y varios tipos de roedores. Del sur llegaron perezosos, monos platirrinos, los grandes roedores capibaras, ungulados específicos de Sudamérica e incluso aves del terror.

En la competición llevaron las de perder los representantes sureños sobre los del norte, a pesar de que la migración neta fue bastante

equiparable. Las especies que migraron al sur se establecieron en un mayor número y se diversificaron considerablemente más, de forma que se cree que causaron la extinción de una gran parte de la fauna nativa de América del Sur. Hubo dos razones principales para el éxito de unos y el fracaso de otros.



Migraciones americanas relacionadas con el cierre del istmo de Panamá (Imágenes de Wikimedia)

La primera fue una razón climática. Hay que pensar que el istmo se encontraba a unos 8º de latitud norte, es decir, era frontera de dos

zonas climáticas no iguales y relativamente diferentes. Eso no hubiera sido así si hubiera ocupado una posición ecuatorial. Los animales del flujo norte-sur no requerían grandes adaptaciones para tolerar las condiciones tropicales que predominaban más al sur, por lo que tuvieron libre el camino para expandirse a su arbitrio por el continente austral. En cambio, los emigrantes sudamericanos tuvieron que enfrentarse a cambios de clima y vegetación más extremos, los cuales se hicieron especialmente notorios en el momento en que llegaron a la región central de México, donde se levantaba una cordillera volcánica que lo atravesaba a la altura del paralelo 19º N, que creaba con su altura unas condiciones más secas y frías que las del sur. El resultado fue que la mayoría de los "tropicales" sudamericanos no lograron atravesar esta barrera, quedando confinados en América Central. En cuanto a aquellos grupos que lo lograron, su variedad disminuyó a medida que iban más al norte debido a las condiciones ambientales más secas y extremas, lo cual restringió en gran medida su éxito en el continente boreal.

La segunda razón fue el que la fauna norteamericana era genéticamente más resistente y adaptable como consecuencia de la continua presión selectiva a la que se había visto sometida durante los anteriores años del Cenozoico, cuando debieron competir con fauna que venía de Asia, Europa e incluso de África, continente este que estaba unido a Europa desde hacía más de 25 millones de años.

El resumen de todo ello es que después del gran choque la fauna del continente americano cambió radicalmente. Muchos géneros de animales desaparecieron, sobre todo en la América austral, en donde se extinguió casi toda la fauna autóctona mientras surgía otra que constituyó la moderna fauna del continente sudamericano.

Cambiemos ahora de zona geográfica para comentar las interrelaciones que la biosfera mantuvo a través de la zona de unión entre Asia y América del norte. Actualmente ambos territorios se encuentran separados, pero no siempre fue así.

Hay evidencias biogeográficas que demuestran que Asia y Norteamérica estuvieron unidas con anterioridad. Podemos basar esta hipótesis en el hecho cierto de la semejanza entre los fósiles de ambos extremos del mundo. Sirva de muestra los restos de dinosaurios de finales del Cretácico, datados en unos 69 millones de años, muy semejantes en las dos zonas. Por contra, no hay tantas evidencias del intercambio de mamíferos, posiblemente por ser más difícil encontrar vestigios debido a sus pequeños tamaños. No obstante, esta migración está demostrada mediante fósiles encontrados en China, de hace 50 millones de años, ya en pleno Cenozoico, y además se sabe que pudo ser intensa en Norteamérica hace unos 20 millones de años. Algunos de estos animales, como los gatos dientes de sable, ocuparon un vastísimo territorio desde Asia, Europa, África hasta América del norte. El que hubieran llegado al nuevo mundo sólo se puede explicar si el estrecho de Bering hubiera estado cerrado por un puente terrestre.



El Puente de Beringia hace 25.000 años

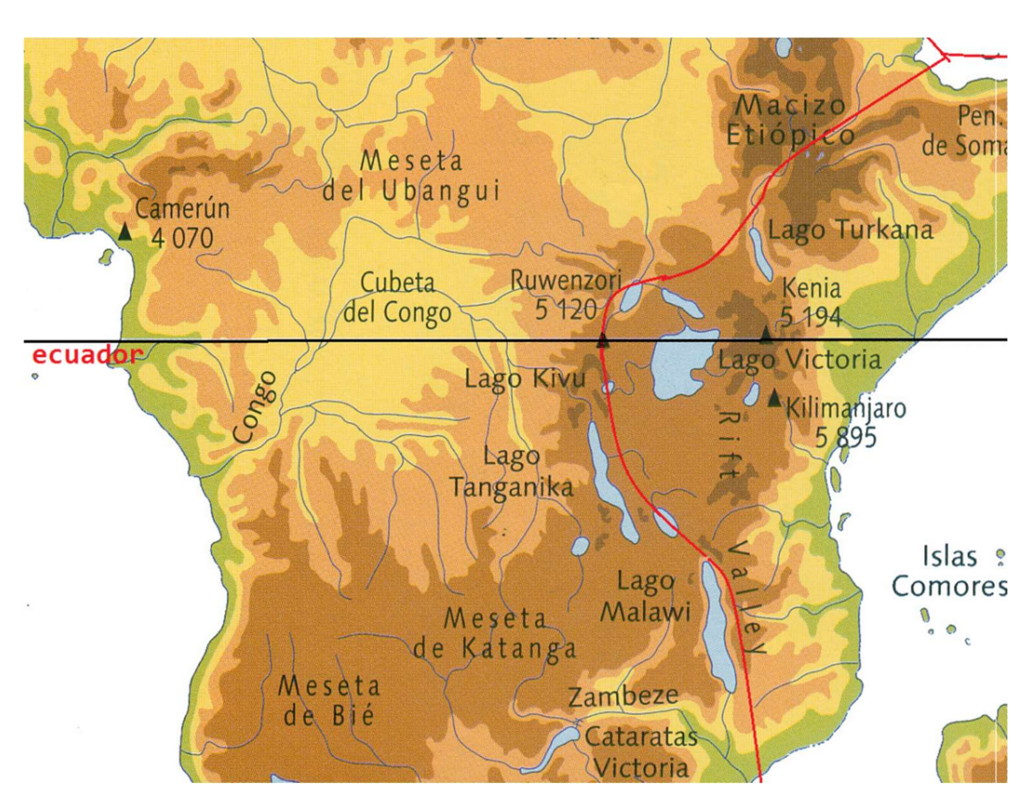
Es lógico que se tenga más conocimiento de los hechos más próximos en el tiempo, como así ha sucedido con los últimos cerramientos de Bering. Se suele hablar del "Puente de Beringia" a un amplio territorio entre Siberia y Alaska que se formó al menos dos veces, una hace 40.000 años y otra hace 25.000 y que resistió

durante unos 14.000 años. Se formó durante una de las últimas glaciaciones, en la que el nivel de los mares bajó unos 120 metros al haber sido secuestrados grandes volúmenes de agua en los nuevos hielos que se habían generado. El descenso de las aguas dejó al descubierto un amplio territorio de hasta 1.500 kilómetros de ancho entre Asia y América.

Por el estudio de restos fósiles de la vegetación se ha llegado a la conclusión de que sorprendentemente en el Puente de Beringia se disfrutaba de un clima templado y seco, de forma que los hielos lo respetaron, permitiendo su colonización por plantas y animales que allí vivieron. Y es más, está comprobado también que no sólo poblaron el territorio, sino que también lo aprovecharon para migrar en ambas direcciones. Desde Asia cruzaron algunos mamíferos como el león y el guepardo, que evolucionaron haciéndose especies norteamericanas endémicas ahora ya extintas. Y desde Norteamérica migraron a Asia los camélidos que, como ya se ha comentado, más tarde se extinguieron en su territorio original. Por allí pasaron también los mamuts hacia América. Habían salido de África hacía unos 3 millones de años vía Europa y hacia Asia, casi a la par de los antepasados de los elefantes asiáticos. Existen importantes evidencias de que por allí pudieron entrar los seres humanos al territorio americano, hipótesis que comentaremos en un capítulo posterior.

Durante los últimos 20 millones de años el clima global se enfrió considerablemente, con un descenso medio de la temperatura de unos 11ºC y un cambio en la vegetación que incluía una reducción de la franja boscosa ecuatorial.[3] Pero lo más importante es que el continente africano experimentó otros cambios climáticos en ese período de tiempo, cambios directamente provocados por acontecimientos geológicos en este territorio, más concretamente en su mitad oriental. Todo ello, sin olvidar que la tendencia climática hacia el frío hacía que los mares se calentaran menos y que la atmósfera retuviera peor la humedad.

Todo se debió al hundimiento del valle del Rift en un momento en que el perfil de las lluvias iba decreciendo. Ya comentamos en el anterior capítulo del Cenozoico que se había iniciado hacía unos 20 millones de años y que dividió el continente africano en dos zonas, a oriente y a occidente. Esta tremenda grieta estuvo acompañada por una importante actividad volcánica que supuso la remodelación de la geografía central africana, al elevarse el nivel por la aparición de dos cúpulas magmáticas, una en Kenia y otra en Etiopía, de más de 2.500 metros sobre el nivel del mar, y conos volcánicos de más de 5.000. Estas alturas ejercían una "sombra" sobre la pluviometría de la franja ecuatorial de África que en un principio estaba recorrida en su totalidad por una espesa masa boscosa.



Mapa de la zona de los grandes lagos africanos en el gran valle del Rift (línea roja)

La consecuencia fue un cambio en el patrón de lluvias en la zona este de esta franja, ya que a los monzones atlánticos, conocidos como monzones africanos, que regaban con generosidad durante el verano las selvas occidentales, les costaba llegar a la zona oriental

del continente, de forma que a aquellas zonas altas llegaban muy debilitados. Allí los bosques comenzaron a ser más débiles y escasos, abriéndose grandes claros que rápidamente fueron ocupados por el monte bajo y la sabana. Una vez más se producía el dominio de las gramíneas sobre las masas forestales.

En el mapa anterior podemos apreciar lo dicho. Los monzones que entraban desde el Atlántico "sobrevolaban" la selvática cubeta del Congo para llegar débilmente a la zona de la falla del Rift que estaba protegida por las alturas de los montes Ruwenzori, Kenia y Kilimanjaro y el Macizo Etiópico. Ésa es la zona en donde se produjo el cambio de especies vegetales al disminuir la intensidad de las lluvias.

Sobre este horizonte más seco y con nichos ecológicos más disgregados, la falla del Rift se seguía moviendo, generando fracturas y hundimientos a todo lo largo de ella, hasta constituir un hondo valle de hasta mil metros de profundidad y cinco mil kilómetros de longitud en sentido norte/sur, lo que creó una nueva barrera, en este caso geográfica, que también condicionó en gran medida el aislamiento medioambiental de determinadas zonas en las que se desarrollaban unos particulares microsistemas.

En conjunto, África desplegó en la parte oriental de la franja ecuatorial un escenario asombrosamente variado, con tierras altas muy frías y valles verdes en donde se amoldaban manchas de frondosos bosques, y otras zonas con extensas sabanas. En conjunto, un lugar ideal para estimular nuevas vías de evolución en aquellos animales que hasta entonces habían prosperado al abrigo de las antiguas y vivas selvas ecuatoriales. Entre ellos, los simios. Y entre ellos, los homínidos. Todo ello lo empezaremos a analizar a partir del siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 51:

1. “*Cenozoic climate change influences mammalian evolutionary dynamics*”, Borja Figueirido et al. En este artículo de PNAS de enero de 2012 encontraréis una explicación más amplia de esta correlación climática.
2. En este enlace

   [http://www.herbogeminis.com/IMG/pdf/historia_del_clima_de_la_tierra_anton_uriarte.pdf]

   podéis obtener un pdf del libro “*Historia del clima de la Tierra*” de Antón Uriarte (2010).
3. “*Hydrologic cycling over Antarctica during the middle Miocene warming*”, Sarah J. Feakins et al., publicado en la revista Nature Geoscience de junio de 2012.

52. Iniciación a los más próximos homínidos

***NOTA**: A partir de este capítulo adoptamos un ligero cambio en la nomenclatura taxonómica de los simios, aceptando la más moderna, aunque más compleja, que presento en el árbol filogenético de unos párrafos más abajo. Lo más esencial es que lo que hasta ahora, y según la más antigua nomenclatura, era llamado homínido ahora lo llamaremos homininos. Para mayor enredo, la acepción "homínido" se mantiene, aunque cayendo unos escalones en el árbol, ya que ahora con este nombre nos referiremos a los simios africanos junto con los humanos: gorilas, chimpancés, bonobos, formas arcaicas del Homo y especies Homo. Dicho esto, prosigamos con el relato.*

Con lo dicho en el capítulo anterior, que titulamos como "*Los últimos cinco millones de años*", vamos a dar por cerrado el estudio de lo que pasó en el árbol filogenético de la Vida ¿Totalmente? No. Nos queda aún mucho que hablar de unas especies muy particulares. A partir de este capítulo y en los dos sucesivos focalizaremos la atención en nuestros más cercanos antepasados hasta llegar a *Homo sapiens*. Hoy comenzaremos con nuestros primos de la selva.

En este momento de la historia nos encontramos contemplándola desde la distancia, más o menos en un fotograma de hace aproximadamente unos cinco millones de años antes de hoy. Sabemos por el anterior capítulo que una amplia zona del este africano se había visto alterada progresivamente en su geología, clima y biotopos a lo largo de los anteriores 20 millones de años. El panorama se había transformado desde unas potentes pluvisilvas tropicales a un tablero de ajedrez en donde, escaqueadas, se disponían manchas de frondosos bosques húmedos pero más secos

que las antiguas selvas y grandes extensiones de praderas y arbustos. Todo ello cruzado casi de norte a sur por una meseta en donde se hundía a cuchillo el valle del Rift. Este último era una zona atravesada por ríos caudalosos, con la influencia del calor magmático que trabajaba en su propio proceso de formación, un clima relativamente apacible y muchos ungulados paciendo en la sabana. Una geografía amable para la vida.



Imagen de la actual sabana de Kenia. No debía de ser muy distinta hace unos cinco millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Era la geografía en donde tuvieron que pelear por la subsistencia unos animales muy próximos filogenéticamente a nosotros los *Homo*. Nuestros ancestros.

Los simios habían sido muy abundantes en el vasto territorio del ecuador africano hace unos diez millones de años, cuando aún las húmedas selvas tropicales se extendían con vigor de oeste a este. Este hábitat les proporcionaba todo lo que sus vidas les pedían,

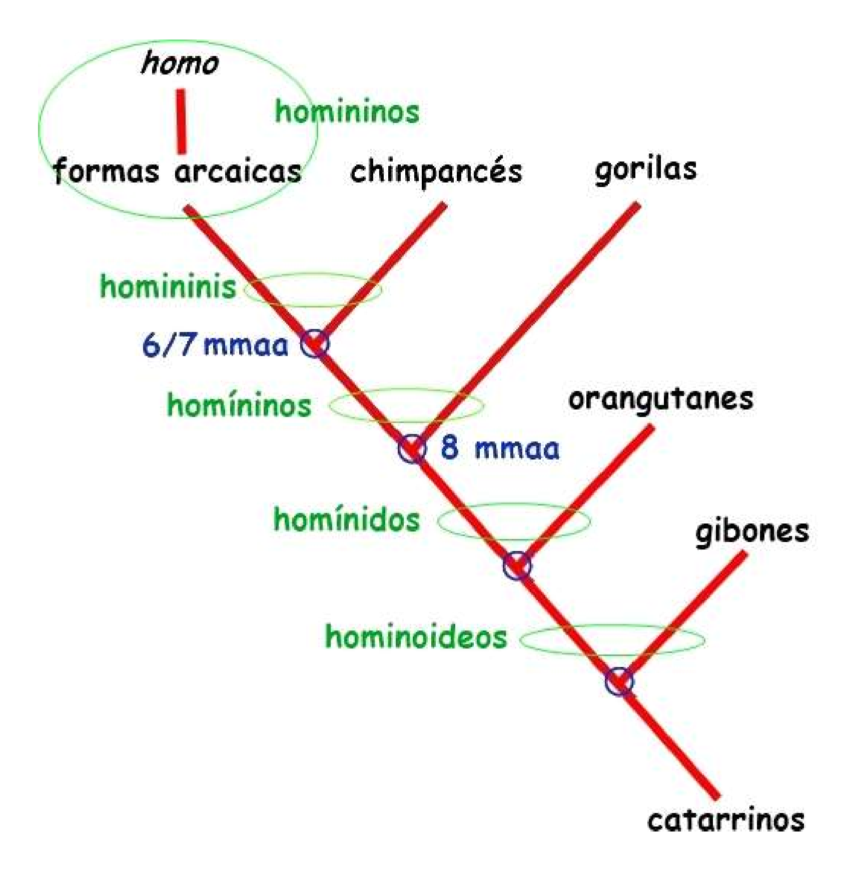
básicamente fácil comida y protección, y de ahí el gran éxito del que disfrutaban en aquel momento por las ramas del árbol evolutivo. Los podemos imaginar por las frondas del dosel arbóreo moviéndose braquiando colgados de las ramas por los brazos, comiendo frutos, brotes y hojas. A veces, incluso algún sabroso insecto o gusano.

Poco a poco estos animales habían empezado a declinar, se cree que por los cambios geológicos que modificaron y redujeron sus hábitats, de forma que hace unos 7 millones de años la mayor parte de las especies habían desaparecido. Con el tiempo, empujados por la presión medioambiental, algunos de ellos abandonaron sus ancestrales costumbres arborícolas y bajaron a la sabana en busca de nuevas oportunidades. A aquellos que habitaban al este no les quedó otra alternativa, más allá de las montañas de hasta 5.000 metros, en la extensa cuenca del Rift, sobre una geografía vegetal cada vez más rala y fragmentada, pues los árboles entre los que buscaban su sustento habían prácticamente desaparecido. Estos pioneros empezaron a prosperar casi milagrosamente (aunque la evolución no sabe en realidad de milagros, sino simplemente de formas exitosas) a la vez que decaían sus primos que seguían en las selvas húmedas del oeste, en la cuenca del Congo y en el golfo de Guinea. De estos, los gorilas, bonobos (chimpancé enano) y chimpancés comunes son sus últimos y únicos descendientes.

Hace 8 millones de años se habían desgajado las dos ramas a partir de algún antepasado común de gorilas y chimpancés. Dos millones de años más tarde, unos pocos de los esforzados habitantes de la zona este africana decían adiós a los protochimpancés. Atrás quedaba el ancestro compartido, haciendo posible que una de las dos ramas experimentara uno de los mayores asombros evolutivos: los *Homos* y sus formas arcaicas.

Tenemos ya a los homininis construyendo sus respectivas ramas en el árbol de la vida. No sabemos mucho de ellos, pero por su proximidad familiar es casi obligatorio conocerlos un poco mejor, por lo que procede hacer ahora un sucinto paréntesis para comentar

algunos aspectos de las costumbres de nuestros primos más cercanos, los chimpancés y los bonobos. Con ellos andamos hombro con hombro desde hace muchos millones de años y compartimos con ellos aproximadamente el 96% de nuestro acervo genético.[1]



Árbol filogenético de los hominoideos con la moderna nomenclatura taxonómica. ¡Ojo con las tildes!

Ambos son de fisonomía muy parecida, aunque los bonobos son más pequeños, lo cual encaja bien con los análisis genéticos que indican que ambas especies se separaron hace sólo un millón de años. Los bonobos habitan al sur del río Congo, mientras que el chimpancé lo hace en extensos territorios al norte del mismo río. Parece que la divergencia entre ambos fue condicionada por la barrera natural que suponía el río Congo, que imposibilitaba el intercambio sexual entre individuos. Para hacernos una idea de cuan terrible era la barrera que los aislaba, y los sigue aislando, diremos que el Congo actual tiene

unos 4.380 kilómetros de longitud y en su curso medio puede alcanzar anchuras de 25 a 30 kilómetros.

Sus costumbres son también ligeramente diferentes. Ambos son tribales, viviendo en clanes de unos cien individuos formados por varios machos, hembras y jóvenes, que de día se dividen en pequeños grupos mientras buscan comida y luego se reúnen por la noche para dormir. Pero así como entre los chimpancés la jerarquía de dominancia es estricta, llegando a relaciones de violencia, entre los bonobos es de amabilidad y cooperación continua sin nada a cambio. A pesar del dimorfismo sexual –diferencia de tamaño macho/hembra- en el bonobo los encuentros agresivos entre géneros son nulos, ya que las hembras son socialmente tan importantes, o quizás más, como los machos. *Ningún macho bonobo puede liderar si no es a través de la coalición con una hembra* y mantienen una relación de por vida con sus madres y hermanas.

En los chimpancés sus manadas están muy jerarquizadas y los machos están continuamente enzarzados en luchas de poder. Son muy agresivos y celosos de su territorio, y para expandir sus dominios llegan incluso a invadir los territorios de machos rivales, matándolos a todos… a pesar de lo cual suelen sentir simpatía por los perdedores. Por ejemplo, si surge una pelea, casi todos apoyan al más débil, equilibrando de esta manera sus relaciones sociales. Incluso tras atacar a uno más débil en un momento de tensión suele surgir un arrepentimiento, y los mismos que le atacaron empiezan a lamer sus heridas. Los machos permanecen siempre dentro de la misma manada, por lo que les unen relaciones de parentesco muy próximas, lo que suaviza su relación.

Por contra, en ambas especies las hembras jóvenes abandonan la manada de nacimiento para buscar a otro grupo en donde seguir su vida, lo que constituye un sabio resultado de la evolución que preserva la fortaleza genética mediante el entrecruzamiento de individuos de distintos grupos. La entrada de la nueva hembra en un grupo ajeno requiere una serie de hábiles alianzas: la joven debe

engatusar a una hembra adulta del grupo donde pretende ser adoptada. Nos resulta cercano, ¿no?

Diríamos a la vista de lo anterior que chimpancés y bonobos son "casi" humanos, compartiendo aspectos psicológicos y de sentimientos que bien podrían ser el yin y yang de la conducta humana: la agresividad frente a la empatía.

Inicialmente, aquellos primeros homininis que bajaron a la sabana debieron continuar lógicamente, y en la medida de lo que el medio ambiente lo posibilitaba, con su vida de costumbres completamente arborícolas: seguirían alimentándose a partir de vegetales, mantendrían un dimorfismo sexual acusado, consecuencia de la necesidad de competir por las hembras, y mantendrían una incipiente relación social con sus iguales. Pero desde los seis-siete millones de años en que se inició la andadura hasta los primeros fósiles conocidos de especies arcaicas del *Homo*, hay un largo lapso de tiempo, de unos dos millones y medio más, durante los que lógicamente algo tuvo que pasar en el ámbito de la evolución y perfeccionamiento de las habilidades basadas en el bipedismo. Bajar de los árboles para atravesar un retal de sabana en busca del alimento que prometía un mancha de bosque vista en la lejanía, o para beber del río que discurría por campo abierto, fue una aventura que tuvo que seguir un camino dubitativo de pruebas, éxitos y fracasos. Aún faltaba mucho para que aparecieran evidencias de comportamientos propios de una inteligencia más compleja, como fueron la fabricación de útiles de piedra, la caza o la cultura.

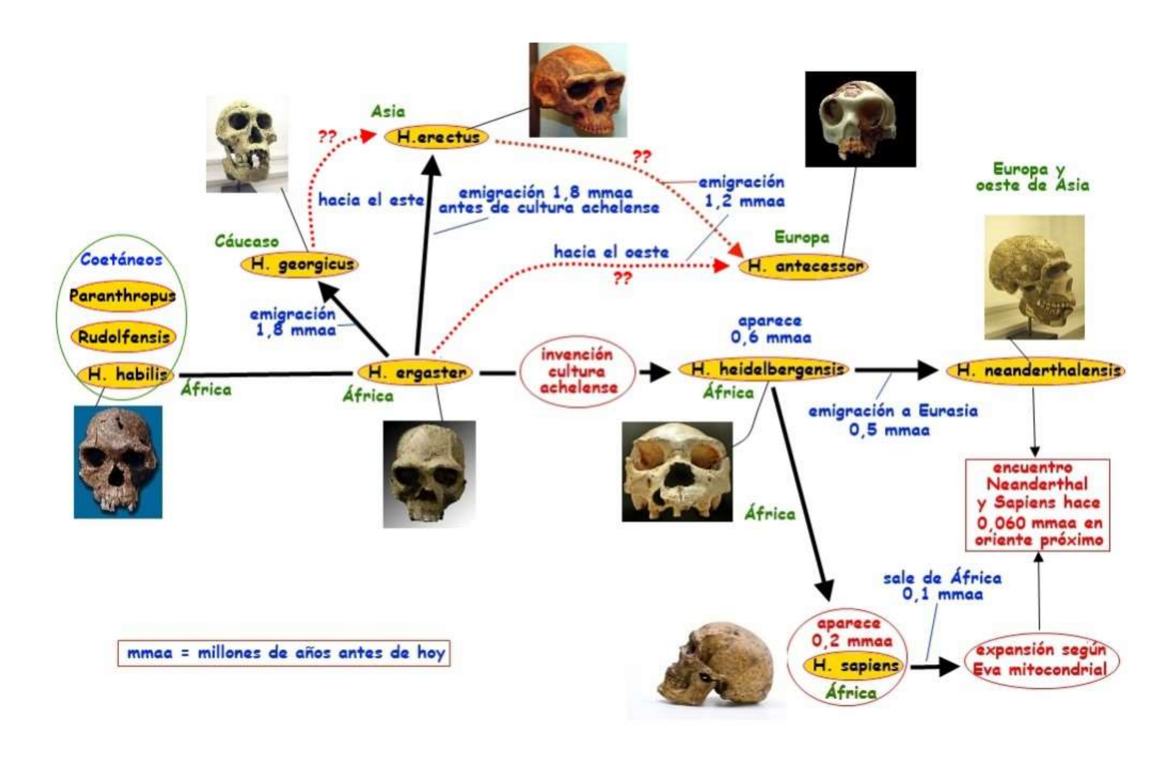
Seguramente habría empezado también un incipiente mundo de relaciones sociales, basado en las interrelaciones de una comunidad arborícola, pero modulado por las nuevas necesidades, algo que se iba aproximando a la vida de los actuales chimpancés. Avisar del peligro, comunicar dónde se encuentra alimento en abundancia, una relación familiar más intensa obligada por la necesidad de conseguir alimentos para madres y crías, alimentos cada vez más escasos en sus hábitats dada la dominancia progresiva de la sabana. Y a partir

de las relaciones familiares, unas relaciones sociales de grupo que pudieron tener su inicio en la colaboración y defensa mutua. Todo ello de forma muy incipiente, primitiva y lenta. No es difícil imaginar que esto es lo que debió pasar en los ciegos dos millones y medio de años sin fósiles.

¿Cómo continuó el camino? El escenario parece que se ilumina hace unos cuatro millones y medio de años, al poco de producirse el inicio de una época de enfriamiento global. A partir de allí disponemos de información ¿suficiente? como para detectar una senda ramificada de cambios en anatomía, costumbres alimenticias, relaciones sociales y complejidad de inteligencia, que desembocó finalmente en el *Homo*. Por delante quedaban por conquistar los grandes hitos evolutivos que les facilitarían tal condición: la bipedestación con todos los cambios morfológicos que ello supuso, la habilidad manipuladora de la mano que se comportó como una auténtica pinza de precisión, un aparato masticador modificado en donde los caninos se asemejaron a los incisivos, un índice de encefalización creciente, un largo periodo de maduración infantil que exigiría por tanto un cuidado de los padres más prolongado en el tiempo, la conquista del lenguaje, la conciencia del Yo y, por último, la conquista de la tecnología.

Sabemos de su evolución gracias al análisis tan tecnificado de los pocos restos fósiles de los que disponemos. La morfología de los dientes es un escaparate hacia el tipo de alimentación e incluso hacia el periodo de maduración de las crías. Esto último permite esclarecer la evolución de la forma de la pelvis femenina. La estructura de los huesos es la base para suponer la robustez corporal, ya que son el anclaje de los músculos, así como para determinar el avance en la conquista del bipedismo. Evidentemente, el estudio de los cráneos permite hacer hipótesis comparativas sobre el desarrollo de las habilidades y del lenguaje. El análisis detallado del entorno en donde se van encontrando los fósiles descubre sus costumbres y hábitos sociales, así como el estudio comparativo entre tamaño de huesos homólogos de machos y hembras permite hacer hipótesis sobre la

relación social entre ellos y sus crías. El camino seguido por los *Homos* y sus formas más arcaicas no se conoce con exactitud, pero estamos convencidos de que lo tenemos está bastante bien conjeturado en base a depurados razonamientos científicos. Razonamientos que, precisamente por ser científicos, quedan a la espera de lo que dirán los estudios de los fósiles que están por encontrar en el futuro.



Cronología y camino evolutivo del Homo (Elaboración propia, imágenes a partir de wikimedia, CC BY-SA 2.5 Generic, dominio público y GFDL 1.2)

Creo que será útil en este punto el presentar, aunque sea sólo sucintamente, el esquema anterior, que nos da a vista de pájaro una útil reseña sobre los momentos y lugares de la evolución y emigración del género *Homo*. Es un adelanto de lo que veremos en un posterior capítulo, en la que completaremos la información general dada hoy sobre el punto de partida que abrió un nuevo y especial camino en el árbol de las especies. Nos preguntaremos cómo fueron apareciendo progresivamente los eslabones de la

familia humana: ¿de qué manera se iban conquistando las destrezas que permitieron nuestro camino evolutivo? ¿Cómo nos extendimos por el planeta?

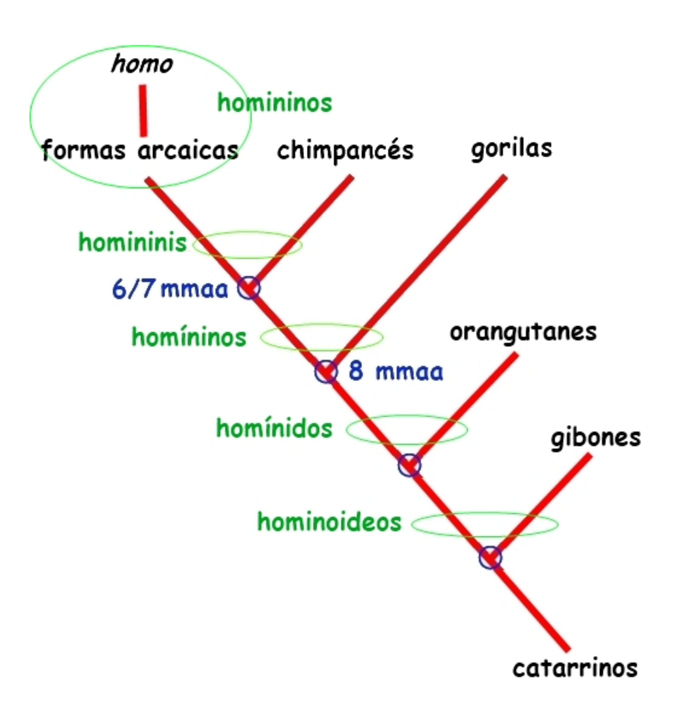
NOTAS DEL CAPÍTULO 52:

1. "*Initial sequence of the chimpanzee genome and comparison with the human genome*", The Chimpanzee Sequencing and Analysis Consortium. Más información en esta publicación de Nature, septiembre 2005.

53. Desde el primer hominino hasta el nuevo Homo

Entre otros temas, en el capítulo anterior habíamos analizado someramente las circunstancias ambientales particulares a las que se vieron sometidos los simios africanos más avanzados, para acabar de desvelar su hábitat, sus modos de vida y su camino evolutivo. Ahora iniciaremos el detalle de esto último hasta el momento en que el *Homo* aparece por primera vez en el escenario.

A manera de ayuda al encuadre del momento, repito aquí el árbol filogenético de los hominoideos que ya conocemos del capítulo anterior.



Los primeros fósiles conocidos de homininos, el grupo formado por los antecesores arcaicos del *Homo* y por él mismo, corresponden a *Sahelanthropus tchadensis* con una antigüedad de 6 a 7 millones de años, más o menos cuando el chimpancé inició su línea filogenética independiente de la nuestra. De “Sahe” hablamos ya en el capítulo

50 "*Oligoceno y Mioceno*". Tras los fósiles de *Sahelanthropus* nos encontramos con los de *Orrorin tugenensis*, con una antigüedad entre 6,2 y 5,6 millones de años. El nombre significa en la lengua de la etnia keniata de los Tugen -los habitantes del lugar del yacimiento- "*el hombre original de Tugen*". La forma de los huesos de sus caderas permite asegurar que de alguna manera en ellos había comenzado la bipedestación como una alternativa más para la marcha.

En la cadena temporal de los fósiles nos encontramos más tarde con los del etíope *Ardipithecus ramidus*, que datan de hace 4,4 millones de años. El estudio de estos fósiles nos indica que Ardi debía ser del tamaño de un chimpancé y que posiblemente aún seguía manteniendo las costumbres arborícolas de sus abuelos, con desplazamientos por braquiación, colgándose de las ramas con los brazos. No obstante, del estudio de la parte superior de su pelvis se puede inducir que también era bípedo, aunque apoyándose en la parte externa de los pies. Es por eso que se cree que *Ardipithecus* aún tenía el dedo gordo en posición no paralela a los otros dedos del pie. Su capacidad craneal, de unos 350 centímetros cúbicos, era muy semejante a la de los actuales chimpancés.

En resumen, los sucesivos fósiles datados en esa extensa época corroboran que el bipedismo ya era una alternativa adoptada por los individuos que comenzaban a abandonar la protección de las cúpulas de los árboles. Como comenta el paleoantropólogo Bermúdez de Castro en su libro "*Orígenes*", tanto *Sahelanthropus*, como *Orrorin* como *Ardipithecus* habían bajado de los árboles, sabían desplazarse bipedestando, pero todavía vivía en ambientes completamente cerrados y boscosos. No se habían atrevido aún con las sabanas. Andaban seguramente de forma torpe, con movimientos parejos a los que efectuaban durante sus paseos por las alturas, recordando aún el balanceo vertical del avance braquiando a través de las ramas. Quizás ayudados con los nudillos de sus manos, que apoyaban en el suelo durante la marcha. Poco a poco la estructura ósea fue cambiando, haciendo cada vez más eficaz el caminar con las dos

extremidades inferiores, de tal forma que hoy en día, para una marcha por tierra, nosotros los hombres estamos mejor preparados con nuestro bipedismo que un chimpancé cuadrúpedo. No es un desdoro para ellos: nos ganan entre las ramas, nosotros sólo somos buenos en tierra.

Podríamos decir que el aparente éxito radica en determinados avances estructurales:

- El hueso coxal (el que corresponde al conjunto de la cadera y bajo abdomen) se ha modificado, de forma que tiene una mayor resistencia estructural, compatible con los mayores esfuerzos que supone para los huesos el soportar el peso corporal durante la marcha bípeda. Recordad que hemos pasado de apoyarnos sobre cuatro patas a hacerlo en una sola durante la marcha.
- Nuestro esqueleto está dispuesto de forma que la fuerza del peso se transmita perpendicularmente al suelo, no hay pérdidas en componentes horizontales del esfuerzo.
- Una tercera causa es que en los bípedos el centro de gravedad está prácticamente situado en el centro geométrico, el ombligo, lo que permite un desplazamiento rectilíneo del centro de masas.
- En lo anterior es determinante el hecho de que las "alas" coxales pasaron a abrirse hacia los laterales. En este giro se vieron implicados también determinados músculos del glúteo, cuyo punto de implante se lateralizó. Con ello se minimiza el desplazamiento lateral del centro de gravedad al andar. Ya no es preciso bambolear las caderas hacia los lados, por lo que se consigue un desplazamiento más eficaz.
- Por último, nuestro pie es plano, con un dedo pulgar alineado con los otros cuatro compañeros, sin hacer pinza, formando una superficie segura donde asentarse. La planta se arquea formando una estructura de "ballesta" que propulsa la marcha.

Andar, en el suelo, es eficiente. No quiere esto decir que bipedestando se sea más veloz, lo que sería una ventaja para cazar o no ser cazado, sino que el desplazamiento a dos patas es

energéticamente el más eficaz, y por eso se puede andar muy lejos. Así, nuestros antepasados ganaban por agotamiento a los ungulados de los que se alimentaban tras cazarlos. O podían ir más lejos a buscar alimento. Por esta razón -además de por otras ventajas, como el poder mirar desde más arriba o el liberar las dos extremidades superiores para otras funciones- la evolución encontró que el bipedismo bien podía ser una solución competitiva y viable. Nosotros, los humanos, somos los mejores testimonios de esta afirmación.



Cráneo de Ardipithecus ramidus, fósil de un individuo coloquialmente conocido en el mundo de la paleoantropología como "Ardi" (Wikimedia, CC BY 2.0)

¿Y por qué bajaron al suelo aquellos simios africanos?

Como ya comentamos en el capítulo anterior, y lo podemos ver también en el capítulo de la serie hermana de El Cedazo "*Lo que se preguntan sus alumnos de 3º de la ESO*",[1] eso fue motivado casi con toda seguridad por la fragmentación que habían experimentado sus hábitats seculares, lo que conllevó una progresiva mayor

dificultad a la hora de conseguir sus alimentos habituales, a los que habría que ir a buscar cada vez más lejos, incluso a otras "islas" boscosas, con la imperiosa necesidad de emprender una peligrosa y desconocida aventura a través del monte bajo y la sabana. Para los primeros homininos, a la larga, la marcha a dos patas se fue demostrando más resistente que la primate, semicuadrúpeda, y por tanto más segura. Quién lo consiguió sobrevivió, perfeccionándola a lo largo de su camino evolutivo.

Arriesgó en la aventura, no tenía más remedio, pero encontró una de las llaves fundamentales que le impulsaría en su camino hacia la inteligencia compleja, hacia el género *Homo*: se puso a dos pies y liberó las manos. La mayoría de antropólogos son de la opinión de que éste fue el primer gran cambio en el camino evolutivo que llevó desde los antropomorfos hasta los humanos.

Liberando las manos pudo usarlas para otros procesos altamente productivos y con gran valor añadido en el campo de la selección natural, como pudo ser el explotar nuevas fuentes de alimentos, desenterrando raíces e insectos, o el poder transportar la comida encontrada y en mayor cantidad hasta una zona segura. Pudo resultar también más atractivo a la hora de conseguir pareja, pues podía ser comparativamente más espléndido, ya que podía conseguir más alimento para sus hembras, que en consecuencia podían gestar más y mejor a sus crías, y podía alimentar también mejor a estas últimas. O bien defenderse mejor ante las amenazas, ya que pudo agarrar palos o lanzar piedras, lo que alargó su radio de acción defensivo.

Avanzando un poco en el tiempo nos encontramos con unos nuevos personajes homininos. Efectivamente, hace 4,2 millones de años se movían por las tierras altas de Kenia los ***Australopithecus***, los "*monos del sur*". Un género del que se conocen hasta seis especies distintas y que desaparecieron hace 2 millones de años. Se movían no sólo por territorios de la actual Kenia, sino desde Sudáfrica hasta el Chad y Etiopía. Su volumen cerebral rondaba los 500 centímetros cúbicos, un gran avance frente a los 350 de "Ardi". Eran de

complexión y musculatura robusta, brazos ya proporcionalmente más cortos, siendo el tamaño de las hembras unos dos tercios del de los machos, un marcado dimorfismo sexual señal clara de que debían seguir peleando por ellas, como ancestralmente, y así mantener un harén en continua "producción" de crías. Habían desarrollado unos molares más grandes y con una capa de esmalte más gruesa, lo que indica el inicio de un cambio alimenticio que comenzaba a pasar de frugívoro y folívoro, a comer semillas y tubérculos más duros, que manipulaban con unas manos en donde el pulgar ya participaba en la pinza de los dedos.



Cráneo de Australopithecus africanus. En este caso el fósil pertenece a la "Señorita Ples" (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Por tanto, parece claro que aún seguirían explotando los recursos de los bosques, que en aquel momento eran más secos y estaban más aclarados. Probablemente no habían abandonado completamente la vida arborícola, aunque pasarían mucho tiempo en el suelo, desplazándose de forma bípeda en grupos pequeños formados por un macho dominante con sus hembras y crías. Por eso la mayoría de los machos adultos serían solitarios. Durante el día, sin objetivos muy

premeditados, se dedicaban a la búsqueda de frutos, vegetales, agua y cobijo, recorriendo lugares conocidos y atentos a nuevas oportunidades, muy alerta ante la posible presencia de otro grupo que pudiera suponer una seria competencia, quizás el intento de monopolizar una zona con fácil alimento. Unos chillidos amenazadores resolverían el tema. Sus cerebros eran un poco mayores que el de los actuales chimpancés, y por estudios de sus fósiles se sabe que estructuralmente no estaban aún capacitados para el habla. No obstante, debemos suponer que serían capaces de intercambiar otras señales sonoras, muy pocas, pero con un incipiente sentido. En su comportamiento no debían ser muy diferentes a los actuales mandriles que habitan las selvas ecuatoriales africanas. A la vista de la morfología de los huesos pélvicos de las hembras, muy semejantes aún a lo que se observa en chimpancés, deducimos que las crías nacían con un grado de madurez avanzado (con relación a la futura madurez como adultos) y que, por tanto, en sus primitivos grupos sólo se necesitaba una rudimentaria socialización de las tareas de cría y alimentación. Por la noche, los individuos de las hordas buscarían la protección de las ramas de los árboles, en donde se reunirían formando grandes grupos.

La primera evidencia de la marcha bípeda moderna se remonta a hace 3,7 millones de años, es decir, en plena "era" de los A*ustralopithecus*. Se trata de unas improntas de huellas de dos o tres individuos dejadas sobre cenizas volcánicas, sobre las que después llovió, cementándolas. Se han encontrado en el yacimiento tanzano de Laetoli. Claramente el pulgar de los pies no estaba separado de los otros cuatro dedos, a semejanza de lo que pasa en las manos, por lo que se reafirma la "hominidad" corporal de los *Australopithecus*. Aún no había aparecido ningún rastro de herramientas. Ello parece indicarnos que la bipedestación fue la primera de las conquistas en el camino del éxito evolutivo del *Homo*. Recordemos lo que decíamos en el capítulo anterior: *"... la bipedestación, con todos los cambios morfológicos que ello supuso, la habilidad manipuladora de la mano que se comportó como una auténtica pinza de precisión,*

un aparato masticador modificado en donde los caninos se asemejaron a los incisivos, un índice de encefalización creciente, un largo periodo de maduración infantil que exigiría por tanto un cuidado de los padres más prolongado en el tiempo, la conquista del lenguaje, la conciencia del Yo y por último, la conquista de la tecnología".



Parte de la traza de huellas de Austalopithecus en el yacimiento de Laetoli, Tanzania (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

De Kenia proviene uno de los fósiles más renombrados de *Australopithecus*. Se trata de la conocida Lucy, una hembra de *Australopithecus afarensis* de 3,2 millones de años de antigüedad. De un metro de altura y unos 30 kilos de peso, estaba dotada con un pequeño cráneo de unos 450 centímetros cúbicos, ligeramente superior al de un chimpancé. Esta "dama" se ha hecho importante para la antropología gracias a que se ha podido recuperar gran parte de su esqueleto, cosa inusitada para un individuo único. Conocer la mayor parte de la estructura ósea de un especimen da mucha información sobre su morfología y los hábitos de su especie. Su nombre, Lucy "…in the sky with diamons", fue realmente un homenaje a los Beatles por parte de los paleoantropólogos que la descubrieron. Cuando se produjo el excitante suceso esta canción les estaba amenizando el trabajo.

Los homininos *Australopithecus* no andaban solos por sus territorios. Coetáneos a ellos, hace 3,5 millones de años, son los fósiles de un controvertido hominino distinto llamado *Kenyanthropus platyops*, que como se puede deducir de su nombre fueron "ciudadanos" de Kenia.

Un poco más modernos aunque en un inicio también vecinos de los australopitecos, se encuentra la rama del género ***Paranthropus***, del que se conocen tres especies. Su capacidad craneal rondaba los 500 centímetros cúbicos. Habitaban principalmente los territorios del África oriental y meridional y estaban caracterizados por una gran robustez de la mandíbula y molares, y una tremenda cresta ósea sagital en el cráneo indicadora de los potentes músculos maxilares que se afianzaban en ella.

Desaparecieron hace unos 1,2 millones de años, y la explicación se sustenta en el hecho de su tremenda especialización en la dieta, centrada en vegetales, semillas y duras raíces. De ahí su potente estructura masticadora. Con esta dieta nunca se podría conseguir la energía que necesita un cerebro con aspiraciones de desarrollarse y ser inteligente. Pensamos que desaparecieron por este motivo al ser desplazados por otras especies con una alimentación más diversificada.

A estas alturas del libro sabemos que la Vida es oportunista, explora cualquier nicho ecológico y sabe sacar provecho de él. Así, junto a *Paranthropus*, sabemos que sobrevivían los individuos de un nuevo género hominino que comía… carne, alimento altamente energético y de fácil digestión.

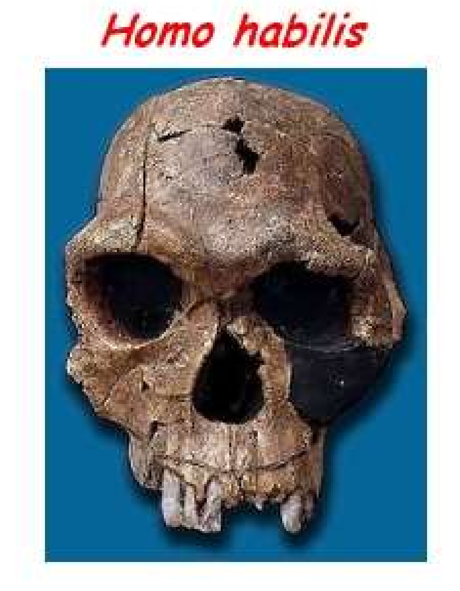
Nos estamos refiriendo a los ***Homo*** de los que tenemos noticias africanas, según los más clásicos estudios, desde hace casi 1,9 millones de años. Digo lo de los más clásicos estudios ya que recientemente se ha reanalizado fósiles del yacimiento tanzano de Olduvai con el resultado de que se debería adelantar la aparición del género *Homo* hasta una época de hace unos 2,3 millones de años.[2]

Sea cómo y cuándo fuera, con ellos se abrió la puerta de la humanidad de pensamiento abstracto, racional y planificador, de sociedades complejas y tecnologizadas.



Paranthropus aethiopicus

Homo habilis



Cráneos de Paranthropus y de Homo habilis donde podemos observar la mayor robustez del primero (Wikimedia, GFDL 1.2 y dominio público)

¿Por qué hemos clasificado a los *Homo* como un nuevo género? ¿cuáles fueron las características morfológicas o culturales que usan los antropólogos para abrir una nueva ficha en la filogenia?

Usando palabras del paleoantropólogo José María Bermúdez de Castro: "*Los científicos hemos decidido que tener un cerebro de más de 500 centímetros cúbicos y capacidades cognitivas apropiadas para transformar la materia prima pueden ser criterios suficientes como para pertenecer al selecto club del género Homo*".[3] Daba igual si por su aspecto fueran más parecidos a un chimpancé que a ti y a mí. A efectos clasificatorios ha primado el criterio de la capacidad cerebral y del uso avanzado de esta capacidad. Y se piensa

que estas dos características aparecieron por primera vez con los nuevos *Homo*'s: los ***habilis***, de ahí su nombre.

No obstante lo anterior, a los antropólogos se les plantea un serio dilema. En el yacimiento etíope de Gona se han descubierto útiles "humanos" con una antigüedad que ronda los 2,5 millones de años, si no más.[4] Y para acabar de sobrecalentar aún más las emociones antropológicas se acaba de publicar (2015) en la revista Nature un artículo [5] acerca de lo que parecen ser unas herramientas líticas aún más antiguas, datadas en 3,3 millones de años, encontradas en el yacimiento keniata de Lomekwi.

¡¡Pero ¿no eran los *Homo habilis* de 1,9 millones de años los que inventaron la tecnología?!!

Sólo caben dos soluciones imaginables: ¿fueron los *Homo habilis* más antiguos de lo que se cree hasta ahora –mandan los fósiles- o bien algún antiguo *Australopithecus*, u otro hominino de la época como pudo ser *Kenyanthropus*, ya había sido capaz de fabricar herramientas líticas?

Dado que los *habilis* crecían y se desarrollaban prácticamente como lo hacían los *Australopithecus*, ¿por qué tiene que ser más importante, a la hora de fijar criterios de clasificación, el hecho de tener un mayor cerebro? ¿No debería ser más importante el resultado de la actividad de estos cerebros, aunque fueran distintos en tamaño? Más aún sabiendo, como lo veremos en una futura capítulo, que la evolución cultural del hombre siempre fue significativamente posterior a la de su encefalización.

No tenemos datos fósiles de *habilis* tan antiguos, aunque la información comentada más arriba que nos llega desde Olduvai lo acercan mucho, como para que fueran coetáneos de las herramientas encontradas en el yacimiento de Gona en Etiopía. A lo que habría que añadir los resultados de un estudio presentado en 2015,[6] que nos informa de la existencia de unas ciertas evidencias acerca de que, estructuralmente, las manos del *Paranthropus* o de las especies más

modernas de *Australopithecus* estaban ya preparadas para el manejo "delicado" que suponía el tallar piedras.

Con estos datos, una incógnita y una neblinosa realidad, algunos paleoantropólogos se comienzan a preguntar: ¿debería abandonar *habilis* el género *Homo* para ingresar en el *Australopithecus*? ¿Un *Australopithecus habilis*?

La controversia está servida. Más allá del evidente interés para los especialistas, cosa en la que no entro, me parecería asombroso el que unos seres tan atrás en la línea evolutiva fueran ya capaces de plantearse pensamientos recursivos, los necesarios para poder racionalizar, a partir de una piedra en bruto, el proceso que tendrá como resultado una herramienta y el camino de manipulación intermedio.

Mientras esperamos para ver cómo se resuelve tan interesante hipótesis -en el próximo capítulo aportaré lo que puede ser una posible pista-, nosotros seguiremos los siguientes pasos de nuestra historia sin abandonar los actuales cánones de la ortodoxia antropológica: revisaremos el posible devenir filogenético *Homo,* empezando por el *habilis.*

NOTAS DEL CAPÍTULO 53:

1. Se trata de la entrada VIII, *"¿Por qué trabajamos con las manos en vez de con los pies?"*, de la serie hermana en El Cedazo "*Lo que se preguntan sus alumnos de 3º de la ESO"*.

2. Esta información se publicó en la revista Nature de marzo de 2015: "*Reconstructed Homo habilis type OH 7 suggests deep-rooted species diversity in early Homo*", Fred Spoor et al.

3. Ver esta entrada de enero de 2015, "*Homo habilis y el selecto club de los elegidos*", en el blog de Bermúdez de Castro "*Reflexiones de un primate*".

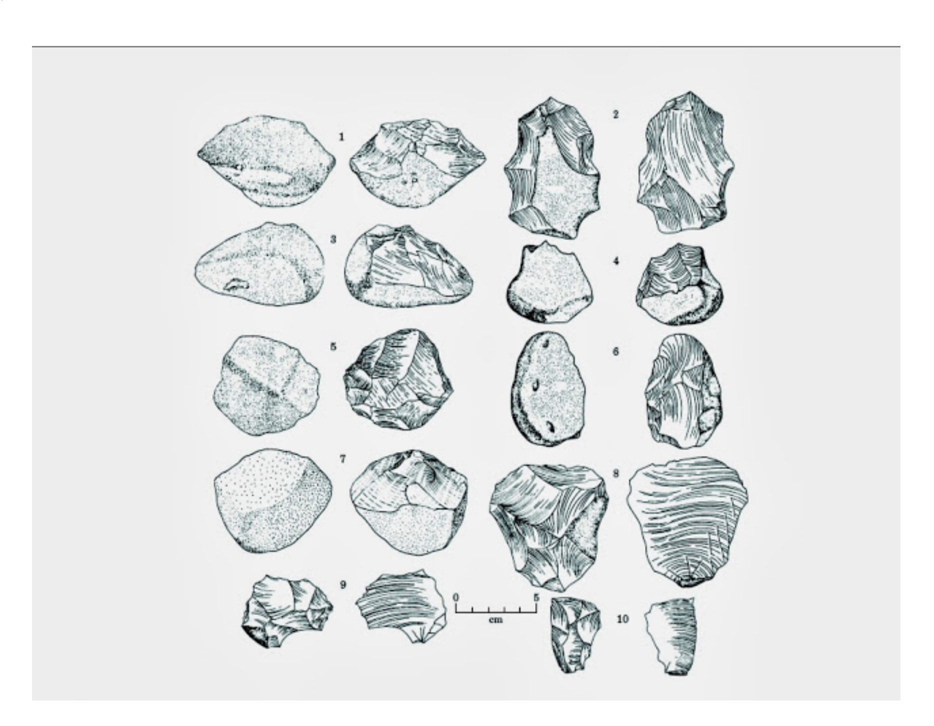
4. "*The World's Oldest Stone Artefacts from Gona, Ethiopia: Their Implications for Understanding Stone Technology and Patterns of Human Evolution Between 2·6–1·5 Million Years Ago*", Sileshi Semaw (mayo 2000). En esta publicación de Journal of Archaeological Science (2000) 27, encontraréis más información sobre este tema.

5. "*3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya*", Sonia Harmand et al. Artículo publicado en la revista Nature de mayo de 2015.

6. "*Human-like hand use in Australopithecus africanus"*, Matthew M. Skinner et al. Publicado en la revista Science de enero de 2015.

54. Los Homo

En el capítulo anterior llegamos a conocer el devenir evolutivo de nuestros ancestros “humanos” más antiguos, hasta que nos encontramos con un nuevo individuo que había incrementado su capacidad craneal en una cantidad significativa: el *Homo habilis*. Habíamos sembrado la duda de si en vez de homo correspondería catalogarle como australopiteco: *Australopithecus habilis.* También avisamos de nuestro amor por la ortodoxia, posición que se me antoja juiciosa para un simple aficionado de estos temas, así que en nuestro escrito seguirá siendo un *Homo.* Pero ¿quién fue este hombre nuevo?



Dibujo de artefactos líticos encontrados en el yacimiento de Gona (A partir del informe sobre el tema del profesor Shileshi Semaw,[1] fair use)

Como comentamos en el capítulo 51 titulado como "*Los últimos cinco millones de años*", hace 2,6 millones de años, como consecuencia de su deriva continental, se unían las dos Américas cerrando con ello el actual istmo de Panamá. Esta circunstancia consolidó el último drástico descenso de las temperaturas globales. Datadas aproximadamente en esta época se han encontrado en el yacimiento etíope de Gona las primeras herramientas líticas que fueron ideadas y fabricadas por un ser vivo.

Muchos antropólogos opinan que este cambio climático tuvo que ser la espoleta del cambio cultural observado, la presión ambiental necesaria para provocar la emergencia de una nueva habilidad cerebral nunca imaginada. Por desgracia, los fósiles asociados en el mencionado yacimiento etíope no permiten deducir la autoría, quedando la duda de qué especie fue la que las talló.

Realmente parece que el árbol de la evolución humana en aquellos lejanos años se nos complica. O se nos está aclarando, según queramos verlo, ya que recientemente se ha comunicado [2] la existencia de una posible y nueva especie *Homo*, que a la vista de la morfología del fósil analizado -una mandíbula encontrada en el yacimiento de Ladi-Geraru, en la región etíope de Afar-, sería la de un individuo intermedio entre el australopiteco y el habilis. Se movía por una verde sabana africana, semejante al actual Serengueti, hace 2,8 millones de años ¿suficientemente inteligente como para ser el artífice de las herramientas de Gona? No en vano Gona está a escasos 50 kilómetros del yacimiento de Ledi-Geraru.

Puede que más al sur pasara algo semejante. En septiembre de 2015 saltó una posible sorpresa en el mundo de los homos. En el yacimiento sudafricano de Dinaledi se han encontrado los restos de al menos 15 individuos, que se están catalogando como de una nueva especie: ***Homo naledi***. Su estructura anatómica se encuentra, aproximadamente, entre la de los australopitecos y los hábilis. El gran interrogante es que aún no ha sido posible datar su antigüedad

y, por tanto, queda todo sujeto a la controversia y a futuros estudios.[3]

Dejemos trabajar a los antropólogos y sigamos con la doctrina tradicional dando un paso más en nuestra historia.

Con una cronología posterior a la de las primeras herramientas líticas aparecen en el registro fósil vestigios de un hominino, que está ya clasificado como del género *Homo*, sustancialmente diferente a los australopitecos, aunque no en su aspecto exterior. Nos estamos refiriendo a una época que tradicionalmente se data en 1,9 millones de años, datación que quedó revisada en 2015 para adelantarla en el tiempo unos 400.000 años.[4] Estos hombres nos han aportado algo muy significativo: con ellos se han encontrado, por primera vez en yacimientos de una especie humana, toscas herramientas de piedra o hueso. Se trataría, por tanto, del primer emparejamiento fehaciente del hombre con su herramienta. Además de esta extraordinaria novedad, de sus restos óseos se deduce un cráneo más redondeado y con una capacidad que en algunos casos superaría los 600 centímetros cúbicos –un tercio mayor que en el australopiteco-. La cara se había vuelto más pequeña y menos prognata, consecuencia de haber disminuido el tamaño de sus muelas y mandíbulas. Sorprende que esto pudiera suceder en el mismo nicho vital que el de los australopitecos o los parántropos -con sus fuertes muelas y grueso esmalte- lo que es clara evidencia de un cambio de hábitos en la base de su alimentación: *comían también carne*. Los productos alimenticios eran cada vez más difíciles de conseguir en un mundo progresivamente más seco mientras que la carroña, restos de animales muertos por predadores superiores, se encontraba al alcance de la mano. ¿Por qué no aprovecharla? No eran unos refinados hombres del siglo XXI, sino unos hombres hechos a la dureza de la vida del Pleistoceno temprano.

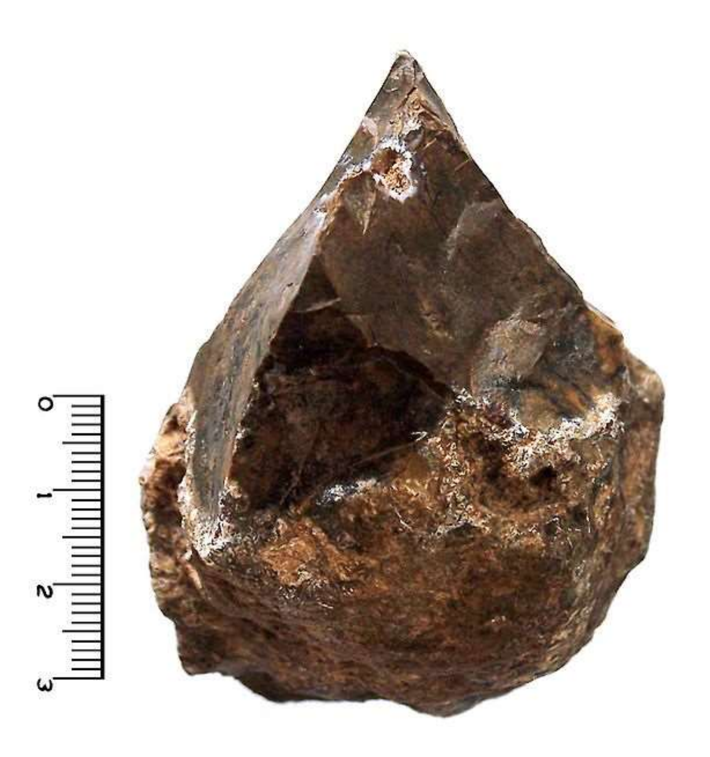
Su esqueleto hace pensar que contaban ya con una arquitectura corporal propia de un *andar vertical*. Pero eso no quita para que su aspecto externo fuera aún bastante similar al de un australopitecino

habituado a la vida arbórea, tal como ya se ha comentado. En esta nueva especie los machos ya no doblaban en peso y tamaño a las hembras, sino que, como en los actuales chimpancés, las sobrepasaban tan sólo en un 20%. Esta circunstancia se revela como muy importante, ya que indica que en sus grupos la presión evolutiva no hacía necesario el dimorfismo sexual. Y eso se debe traducir en que machos y hembras, en cierto sentido, ya debían colaborar en una *sociedad familiar*. Los machos adultos no dominantes no necesitan hacer una vida solitaria dentro de la manada como sucedía con los *Australopithecus*, por lo que es fácil imaginar que además se generarían en el grupo fuertes relaciones de parentesco, suscitándose menos tensión y menos peleas, más colaboración e incluso alianzas.

Todo parece indicar también que a la predominante comunicación gestual se le habría añadido una verbalización incipiente, ya que sus *faringes comenzaban a colocarse en una posición profunda en el cuello*. El análisis del relieve interior de los cráneos, copia del relieve del propio cerebro, indica ya la existencia de una incipiente área de Broca, uno de los centros neuronales de gestión del *lenguaje*. Los neurobiólogos saben muy bien que esta área cerebral también se activa durante la comunicación por gestos. ¿Pudo ser el lenguaje sonoro un valioso refinamiento del lenguaje gestual?

No obstante, para poder "fonar" perfectamente había que tener desarrollado un conjunto de órganos que físicamente lo permitieran. No sólo unas cuerdas vocales emisoras del sonido original, sino también una caja de resonancia muy versátil con la que articular y unir un abanico de sonidos y frecuencias diferentes. Esta caja la forman los conductos respiradores superiores, la boca, la lengua y los labios. Al bipedestar, y tomar por consiguiente la posición erguida, se forzó el giro del cráneo hacia un emplazamiento más elevado y vertical. Ello modificó la forma de la garganta, haciendo que la laringe adoptara una posición más baja, lo que supuso la clave que introdujo la versatilidad necesaria en la mencionada caja de resonancia. Este *Homo* había iniciado el camino que se culminó mucho más tarde, hace unos 150/100 mil años, momento en el que

pudo surgir el lenguaje verbal articulado. Es en este momento cuando se observa, a través de los descubrimientos paleontológicos, algunos desarrollos culturales que parecen manifestaciones de un pensamiento abstracto más complejo. Necesitamos hablarnos interiormente para pensar.



Herramienta típica de la tecnología de modo 1 conocida como Olduvayense (Wikimedia, CC BY-SA 2.5 Generic)

Hasta ahora hemos estado hablando de un “nuevo hombre”, pero aún no hemos desvelado su “apellido”… aunque probablemente ya todos sabemos que nuestro personaje se trata de ***Homo habilis,*** precisamente llamado así por su aparente pericia para la **confección** de herramientas. Sus fósiles fueron encontrados por primera vez en Tanzania por el conocido matrimonio de antropólogos Mary y Louis Leakey. Su antigüedad rayaba los dos millones de años.

Quiero explicar por qué en el párrafo anterior he enfatizado con negritas la palabra “confección”: porque en esto estuvo la clave. Conocemos muchos animales que usan herramientas, pero no están elaboradas. Pajitas para “pescar” termitas, espinas para extraer

insectos de las grietas de los troncos, piedras para abrir huesos, partir nueces o romper la cáscara de los huevos… pero no tenían que confeccionarlas, simplemente tomarlas de su entorno y usarlas, lo cual indica una habilidad que ciertamente se aproxima a lo consciente cerebral. Pero lo del *Homo habilis* se trataba de otra cosa muy distinta.

En contraposición, imaginemos ahora a nuestro primer *Homo* africano rumiando en su cerebro. Primero tuvo que percibir que el canto de una piedra rota cortaba, lo cual era fácil, pero además tuvo que darse cuenta de que esta propiedad cortante podía ser usada para más cosas que cortar el pie que la había pisado. Y esto, el buscar nuevas utilidades, ya es harina de otro costal, pues tiene un componente racional importante. Pero aún hay más. Nuestro hombre se percató de que algunas piedras daban mejores aristas y más duraderas que otras: tuvo que tomar decisiones para encontrar este "tecnologificable" material. Además, se dio cuenta de que algunas piedras eran mejores como herramientas secundarias: al hacerlas chocar con las que se les buscaba filo se conseguía el objetivo de una forma más rápida y limpia. La experiencia le dijo que si tomaba la piedra de una determinada manera y le daba el golpe en unas direcciones privilegiadas, todo iba sobre ruedas, y fue capaz de asimilar esta experiencia. Y, además, fue capaz de transmitir su técnica, que se conoce como tecnología de modo 1, a sus vecinos y parientes. A pesar de que pensamos que las herramientas del *habilis* eran de un solo uso (servían para cubrir las necesidades del momento) todo lo anterior sugiere que estos homos estarían ya muy cerca de procesar en sus cerebros un razonamiento consciente.

Coetáneo de los *habilis* y los *Paranthropus*, el ***Homo rudolfensis*** habitaba también el este de África hace entre 2,4 y 1,8 millones de años. Sus fósiles indican unos individuos un poco más evolucionados que sus compañeros africanos, lo que parece que pudo ser así según los datos de su capacidad craneal, en el entorno de los 750 centímetros cúbicos. Sin embargo, el debate de su clasificación sigue completamente abierto, con la excitante cuestión

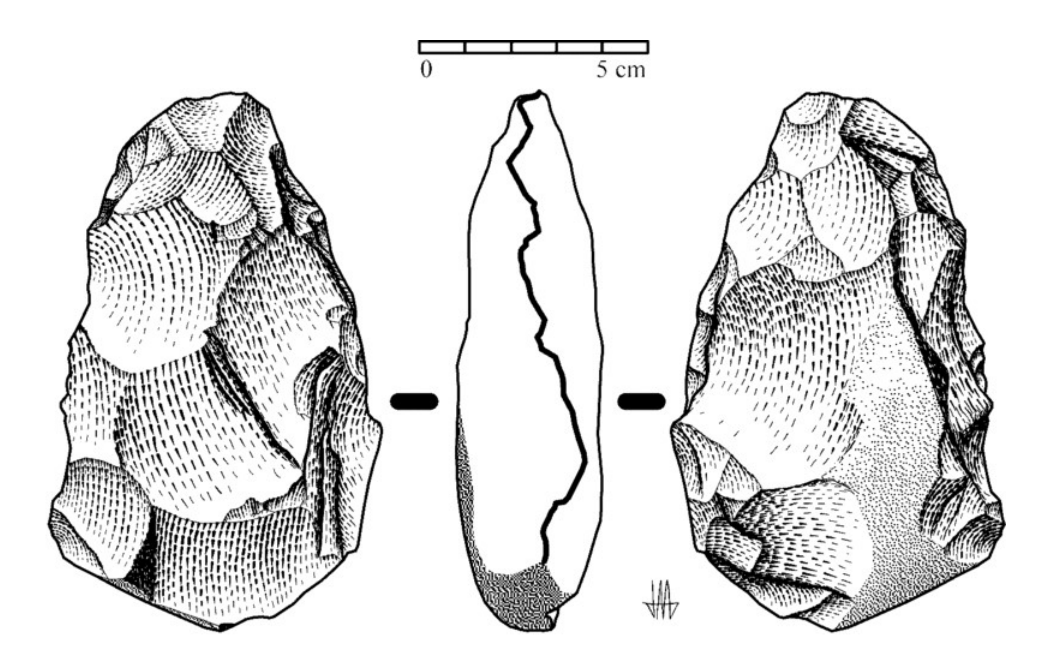
de cómo debió ser la convivencia en el tiempo y en el espacio de tres especies diferentes de *Homo*. Desgraciadamente, ninguna de las tres pudo soportar la selección natural y se nos perdieron en el camino.

Quizás teniendo como antecesor a *Homo habilis* se pasó al también africano ***Homo ergaster***, del que con el tiempo sus descendientes emigrarían a Eurasia muy tempranamente, quizás hace 1,8 millones de años. Posiblemente evolucionaron primero hacia el ***Homo georgicus*** en el Cáucaso y quizás a la par en Asia hacia el ***Homo erectus*** y en Europa, quizás a través de *erectus*, hacia el ***Homo antecessor***.



Niño de Turkana, esqueleto fósil de un niño ergáster de unos 12 años datado en 1,6 millones de años (Wikimedia, CC BY-SA 3.0 Unported)

Pero volvamos al *ergaste.* Nos encontramos en Kenia, África, en el entorno de hace 1,8 millones de años. Eran individuos muy robustos, con una estructura corporal perfectamente adaptada a la marcha pedestre, muy parecida a la del *Homo* actual. Habituados ya a los terrenos abiertos y secos, tenían una talla elevada, hasta 1,80 metros de media, y un dimorfismo sexual poco acentuado. El volumen craneal, aunque era muy variable según los especímenes fósiles encontrados, experimenta con ellos un importante salto cuantitativo en cuanto a su tamaño, alcanzando los 850 centímetros cúbicos, unos dos tercios del de nuestros cerebros. Parafraseando al antropólogo Juan Luis Arsuaga en su libro "*La especie elegida*": "*...El Homo ergaster aparece ante nosotros como la más humana entre las especies primigenias del Homo*". Sin lugar a dudas nos encontramos ante unos individuos que eran muy parecidos a los hombres actuales. Desgraciadamente, también se extinguieron hace 1,4 millones de años.



Herramientas de la cultura Achelense o tecnología de modo 2 (Wikimedia, dominio público)

Pero nos hicieron un magnífico regalo. El *Homo ergaster* había desarrollado una nueva tecnología conocida como cultura achelense, o industria de modo 2, que básicamente consistía en la fabricación y

uso de *utensilios de piedra de* ***doble*** *filo*, como lo son las hachas, de todos los tamaños y con un acabado muy esmerado. Era un salto absolutamente cualitativo en la marcha del *Homo*, ya muy alejado de los *habilis* y no digamos de los olvidados australopitecos.

En Asia encontramos a sus sucesores, los *Homo erectus*. Con una antigüedad considerable, entre 1,8 y 1,6 millones de años, tenemos los fósiles del hombre javanés de Sangiran o el cráneo encontrado en el yacimiento chino de Gongwangling.[5] Más moderno y muy conocido es el Hombre de Pekín cuyos fósiles lo sitúan en hace alrededor de medio millón de años. Se sabe que vivía en cobijos preparados para ello, como cuevas, en donde se han hallado cenizas y carbón vegetal asociados a alimentos, como huesos de animales y semillas quemadas. Es evidente que no les asustaba el fuego, controlaban su manejo y al menos lo usaban para cocinar.

Un indicativo de esto último es el tamaño de sus molares, que eran pequeños en comparación a su masa corporal: masticaban una comida muy fácil. En sus asentamientos se han encontrado miles de instrumentos líticos y de hueso ya muy especializados, como tajadores, rascadores, cuchillos, martillos, yunques, cavadores y algunas puntas. Es evidente que ahora hablamos ya de un *Homo* inteligente. Y no nos olvidemos del también asiático pequeño *Homo floresiensis*, una evolución mucho más moderna del *erectus* (de hace 74.000 años), que se cree resultado del confinamiento geográfico de estos hombres en una isla.

En Europa encontramos a sus más antiguos descendientes en Dmanisi, situado en el Cáucaso, en la república de Georgia, conformando una nueva especie llamada *Homo georgicus*, cuyos fósiles se han datado en 1,8 millones de años. También en Europa y en los yacimientos burgaleses de Atapuerca, en España, se han encontrado fósiles de otra especie heredera de los *erectus*: el *Homo antecesor*. El primer vestigio se encontró en el nivel 6 de la cueva de la Gran Dolina y fue datado en 900.000 años. Más tarde en el

nivel 9 de la Sima del Elefante aparecieron fósiles y utensilios de hace 1,3 millones de años.

Volvamos al ámbito africano. Allí continuó viviendo el *Homo ergaster* a pesar de sus migraciones. Entre él y *Homo sapiens* hay una diversidad de fósiles, a veces no muy abundantes, que nos conducen a la idea de una época con muchas especies humanas conviviendo en el planeta. Los restos encontrados se atribuyen a especies encuadradas bajo un grupo general que Richard Dawkins calificó como "homos arcaicos" nomenclatura que aún se usa. Sus anatomías no se consideran aún como la de los hombres *sapiens* modernos –nosotros- aunque sus capacidades craneales en algunos casos pudieron ser similares. Tienen hasta 600.000 años de antigüedad. Entre otros, podemos mencionar a *Homo heildebergensis* (África y Europa), *Homo rhodesiensis* (África), *Homo neanderthalensis* (Europa y Asia), el hombre de Denisova (Siberia) o el hombre del ciervo rojo (China).

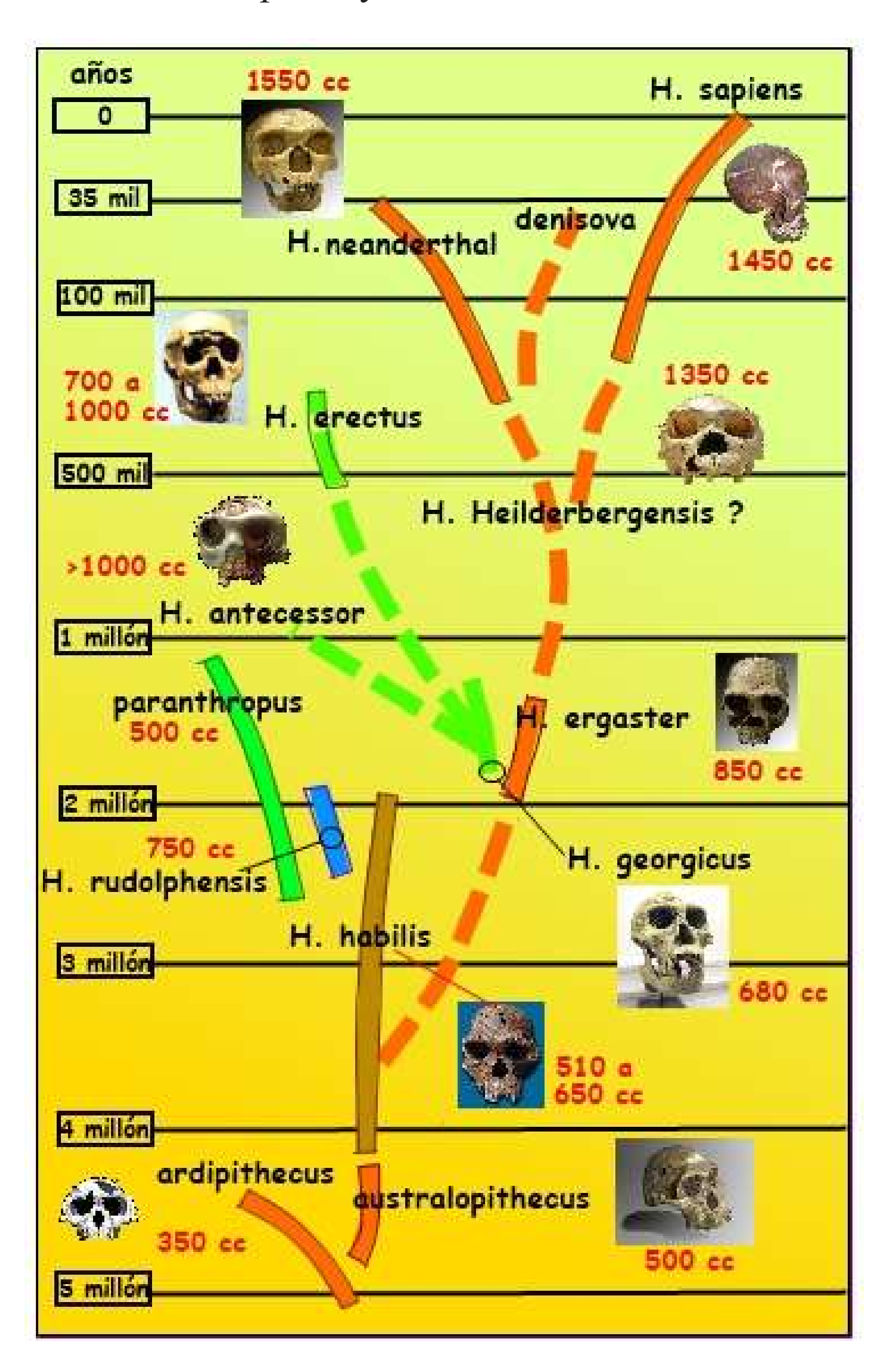
A pesar de su evidente interés y popularidad no voy a profundizar en el mundo de los neandertales, ya que, aunque sabemos mucho de ellos (la paleoantropología ha estado históricamente muy centrada en Europa), no fue una especie especialmente particular desde el punto de vista evolutivo. En el blog hermano El Tamiz hace ya unos años nuestro admirado Pedro escribió una interesante entrada [6] sobre tan recios personajes. Animo a su lectura a todo aquel que tenga interés en el tema. Que serán muchos, no tengo dudas.

En un capítulo posterior de este libro, que titularemos como "*La aventura viajera del Homo*", veremos un poco más de su historia. Aquí comentaremos algunas de sus relaciones deducidas a partir de los estudios de los genomas neánder, denisovano y sapiens moderno.[7] Se cree que los dos primeros tuvieron un ancestro común hace unos 650.000 años, cuya rama se habría desgajado de la que más tarde devendrían los *Homo sapiens* un poco antes, hace 800.000 años. Se sabe también que, a pesar de ser consideradas especies distintas, todas ellas se hibridaron y tuvieron descendencia fértil.[8]

De forma que los hombres modernos de fuera de África llevamos en nuestro genoma entre un 1 y un 4% del de los neandertales, y los modernos papúes, melanesios y aborígenes australianos hasta un 4% adicional de genoma denisovano. Los encuentros se pudieron dar para los primeros, neandertales y sapiens, en una extensa zona geográfica centrada en el Próximo Oriente entre hace 65.000 y 47.000 años, y en el segundo caso, denisovanos y sapiens, más allá de la línea de Wallace (fosa marina entre Asia y Oceanía), cuando hombres denisovanos la cruzaron navegando para emparejarse con mujeres *Homo sapiens*.[9]

También se ha podido saber que las dos especies primitivas, neánder y denisovas, pudieron hibridarse entre ellos, e incluso con una cuarta especie asiática de hace 30.000 años, de la que sólo tenemos evidencias por fragmentos de su genoma.[10] Para añadir más información a lo que parece un intrincado mundo de especies humanas en aquel momento, se ha publicado la existencia de una posible nueva especie asiática, de hace unos 60.000 años, emparentada con *erectus* y neandertales.[11] A todo ello podemos añadir una información muy interesante aparecida recientemente acerca de que el *Homo antecesor* de Atapuerca estaría sorprendentemente más relacionado genéticamente con los homínidos de Denisova que con los neandertales. Por fin, para completar la lista de sorpresas, y no será la última, que últimamente abundan en el intricado arbusto de las especies humanas del Paleolítico euroasiático, volvemos a mirar al tesoro fósil de Atapuerca. En unos pocos metros cuadrados de un recóndito rincón conocido como la Sima de los Huesos se han encontrado restos fósiles de unos 28 individuos de todas las edades, con una antigüedad de 430.000 años. A pesar de coincidir en el tiempo con *Homo heidelbergensis*, y de ser así considerados por ahora, según recientes trabajos que han estudiado su ADN,[12] los homininos de la sima de los Huesos encajarían en la especie neandertal mejor que en la especie heidelbergense, la cual podría pasar a ser un eslabón más de los primeros. Sea como fuere, estas circunstancias parecen

proponer una fecha más remota, quizás un millón de años, para el antecesor común de *sapiens* y nenadertales.[13]



La foto de familia aún sometida a discusión, ¿cómo no? (imágenes de Wikimedia, dominio público, GFDL 1.2 y CC)

Todo ello nos hace pensar que nos queda mucho por saber de las redes de evolución de los *Homo*'s, y a medida que los antropólogos profundicen sus estudios sobre zonas geográficas hasta hoy poco investigadas, como puede ser Asia, y que la genética nos abra un mayor abanico de datos, iremos comprobando que la historia de los hombres del paleolítico superior [14] no fue ni mucho menos lineal, sino más compleja, con especies muy dinámicas y fuertemente entrelazadas geográfica y genéticamente.

El colofón, por ahora, de este camino evolutivo se alcanza con la especie ***Homo sapien***, cuyos individuos ya poseen características anatómicas semejantes a la de los hombres actuales, los *sapiens sapiens*. Sus fósiles más antiguos son los del yacimiento de Omo I, llamados Hombres de Kibish, encontrados en Etiopía, con 195.000 años de antigüedad; los restos de Herto también de Etiopía datados en hace 160.000 años y los fósiles de las cuevas del río Klasies en Sudáfrica, con 125.000 años. Es en esta especie, la *sapiens*, donde culminará el desarrollo de la habilidad que ha permitido al *Homo* dar su paso evolutivo final: el lenguaje plenamente articulado. Y, evidentemente, otras muchas habilidades más.

De él y de su historia de migraciones hablaremos en un posterior capítulo. El inmediato a éste la dedicaremos al análisis de lo que, según mi opinión, es la base que llevó a todas estas especies hacia la inteligencia y de cómo se fueron consiguiendo el cerebro, el dominio de las abstracciones y la simbología y las relaciones sociales.

NOTAS DEL CAPÍTULO 54:

1. "*The World's Oldest Stone Artefacts from Gona, Ethiopia: Their Implications for Understanding Stone Technology and Patterns of Human Evolution Between 2·6–1·5 Million Years Ago*", Sileshi

Semaw, mayo 2010. Ver esta publicación en Journal of Archaeological Science (2000) 27.
2. "*Discovery of 2.8-million-year-old jaw sheds light on early humans*". Reportado en ScienceDaily de marzo de 2015.
3. "*Homo naledi*, a new species of the genus *Homo* from the Dinaledi Chamber, South Africa", Lee R. Berger et al.u La información completa la podéis obtener en la web eLife de septiembre de 2015.
4. Como apareció en la revista Nature de marzo de 2015. "*Reconstructed Homo habilis type OH 7 suggests deep-rooted species diversity in early Homo*", Fred Spoor et al.
5. Más información en una entrada del blog "*Reflexiones de un Primate*" de Bermúdez de Castro, "*Las primeras poblaciones de China*" de febrero de 2015.
6. "*El Homo neanderthalensis*", que podéis encontrar en el blog El Tamiz.
7. "*Genetic history of an archaic hominin group from Denisova Cave in Siberia*", David Reich et al. En este artículo de la reviste Nature de diciembre de 2010 se habla sobre la historia genética de los Denisovanos.
8. Ver la reseña del periódico El Mundo sobre esta noticia "*El ADN de los neandertales revela que las cuatro especies humanas se aparearon hace 50.000 años*", diciembre 2013.
9. En este artículo de la revista Science de octubre de 2013 se habla de esta posible aventura marinera. "*Did the Denisovans Cross Wallace's Line?*", A. Cooper y C. B. Stringer.
10. "*Mystery humans spiced up ancients' sex lives*", Ewan Callaway. Podéis obtener más información del tema a través de este artículo de la revista Nature de noviembre de 2013.
11. "*Hominin teeth from the early Late Pleistocene site of Xujiayao, Northern China*", Song Xing et al. Publicado en la revista Physical Anthropology de febrero de 2015.
12. Publicados en la revista Science (junio 2014), "*Neandertal roots: Cranial and chronological evidence from Sima de los Huesos*", J. L. Arsuaga et al., y en la revista Nature (marzo 2016),

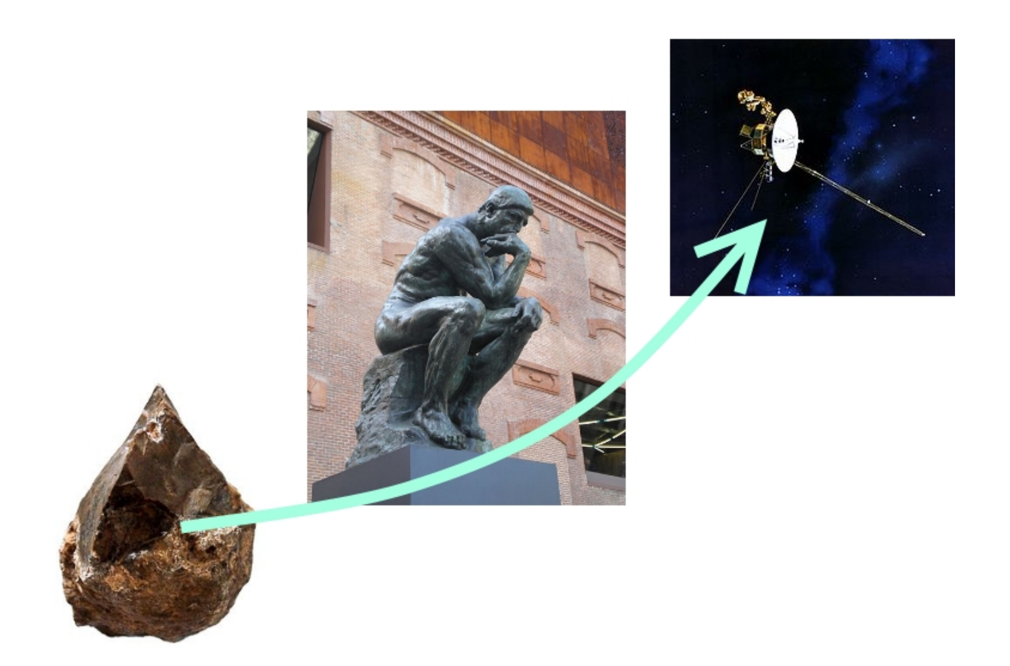
"*Nuclear DNA sequences from the Middle Pleistocene Sima de los Huesos hominins*", Matthias Meyer et al.

13. Como así lo propone Bermúdez de Castro en la entrada titulada "*ADN nuclear de la Sima de los Huesos ¿Quién fue el ancestro común de los Neandertales y de los humanos modernos?*" (marzo 2016) de su blog "Reflexiones de un primate".

14. El **Paleolítico superior** es el tercero y último de los periodos en que está dividido el Paleolítico, la etapa inicial de la Edad de Piedra. Se extiende aproximadamente entre los años 40-30.000 antes del presente (AP) y el 12-10.000 AP.

55. El corazón de la evolución humana

En el capítulo anterior habíamos acompañado a alguno de los primates de las selvas ecuatoriales africanas en su aventura de supervivencia, desde los *Homo* más ancestrales, los *habilis*, con los que se inició la tecnología, hasta el *Homo sapien* dominando el continente euroasiático. El clima les había cambiado drásticamente el campo de juego, pero las nuevas reglas que precisó inventar para continuar su periplo evolutivo le llevó a un nuevo estado fundamental nunca visto: la consciencia que le hizo "humano". Los avances tecnológicos fueron un acicate para el cerebro, y un cerebro más activo propondría explorar nuevas oportunidades. Al final llegó el gran premio de la inteligencia racional.



Alegoría de la condición humana (imágenes de Wikimedia, CC BY-SA 2.5, 3.0 y dominio público)

Siguiendo la cronología de nuestra particular biografía nos tocaría ahora ver cómo fue su aventura viajera desde el primigenio hogar africano. Pero eso lo haremos en un próximo capítulo. Porque en éste voy a introducir un nuevo paréntesis para focalizar el pensamiento sobre aquello que pudo haber originado el cambio evolutivo a partir del que emergió la consciencia.

El trabajo se me antoja harto complejo y lo único que puedo pretender es proporcionar información para suscitar curiosidad, ya que este campo esta lleno de suficientes hipótesis y opiniones, consecuencia lógica del gran vacío de datos directos que le acompaña: la consciencia no fosiliza. Aunque podemos imaginarla escondida en las manifestaciones culturales que estudia la paleontología.

Para empezar, nos deberíamos preguntar qué es lo que nos hace humanos. Personalmente me gusta definirlo de la siguiente manera:

Somos diferentes al resto de los animales *porque somos conscientes de nuestra individualidad personal y somos conscientes de nuestro más próximo entorno. Ambos sentimientos conscientes los percibimos como realidades en sí mismas, cambiantes con el tiempo, y que somos capaces de comprender y manipular según nuestra voluntad con una potente habilidad personal que llamamos raciocinio*.

Todo lo anterior está gestionado por una "máquina" física, nuestro ***cerebro neuronal***, y su capacidad de actuación vía la actividad de sus redes de neuronas.

Pero lo anterior no surge espontáneamente. Lo que nos ha hecho distintos al resto de los animales ha estado sujeto a la terca realidad de la evolución. Gracias a la evolución, nuestra particular máquina de hacernos humanos ha sido capaz por ella misma de alcanzar unos estados de eficiencia en la gestión de la vida, tan sorprendentes en el contexto del resto del entorno biológico del planeta que el sentido de lo humano se ha hecho definitivamente "contundente". Y no sólo

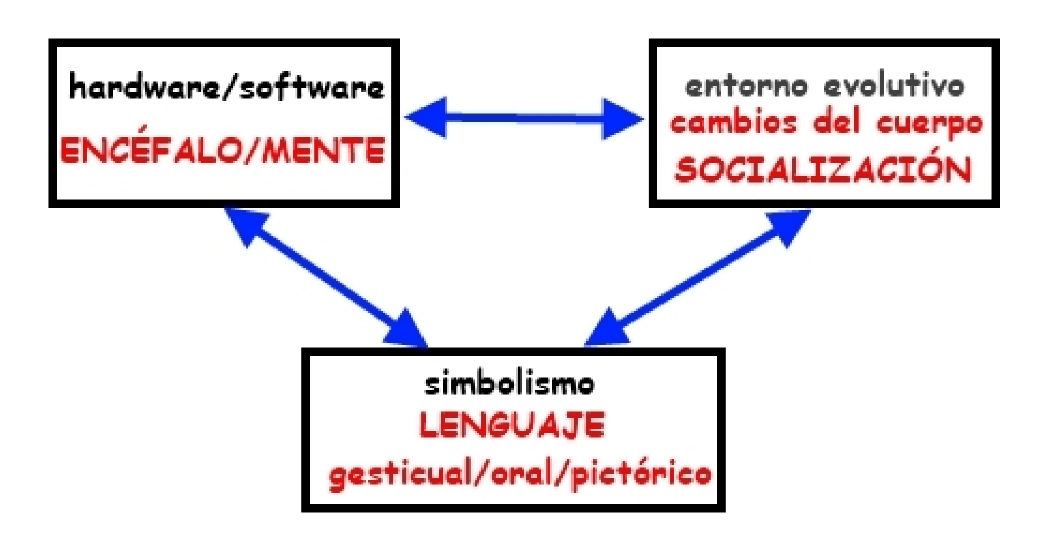
me estoy refiriendo a la potencia de la inteligencia humana, sino también al nuevo mundo tecnológico del *Homo*.

Para ello, y pasito a pasito evolutivo, algún individuo de la línea de los primates (no creo equivocarme si tomo el amplio rango de los primates) consiguió sacar al exterior el proceso de razonamiento que se producía en el interior de su cerebro. El camino pasó por extraer la "base de datos" fuera de los propios circuitos neuronales mediante el uso de la **simbología**, que culminaría con el ***lenguaje*** y con la progresiva percepción de que en "el de enfrente" también existía una máquina mental con la que podía conectarse e interactuar. Con ello abría un campo inimaginable en el mundo de sus relaciones sociales, que con el apoyo del lenguaje se hicieron siquiera aún más trascendentales: se había pasado de la imitación a compartir el conocimiento.

No cabe duda de que hubo un condicionante decisivo que impulsó la inteligencia: las ***relaciones sociales***, el intercambio de experiencias, la pirámide acumulativa del conocimiento. Sin ellas, el individuo posiblemente hubiera tenido escasos estímulos para la mejora. Se había pasado del *impulso* a la *motivación* por alcanzar un ambiente vital más eficaz. Las posibilidades de una inteligencia que no pueda manifestarse en un mundo de relaciones quedan muy mermadas. De hecho se observa que los primates que desarrollan unas relaciones sociales más complejas son los que tienen un cerebro más grande. Los neurólogos lo explicarían muy bien: las redes neuronales necesitan ejercicio y las relaciones sociales son un buen *sparring*.

Lógicamente, ambos aspectos, encéfalo/mente y entorno social, se manifestaron cruciales en el salto hacia las culturas avanzadas y tecnologificadas. Una mayor capacidad para el manejo de los datos, que además son más intensamente compartidos, permitió el progresivo perfeccionamiento del conocimiento y su gestión. Su acumulación en el creciente acervo cultural de las sociedades y su aplicación, vía cambio de costumbres y de tecnología, fue decisivo

para la mejora de la competitividad evolutiva de la línea primate que lo consiguió.



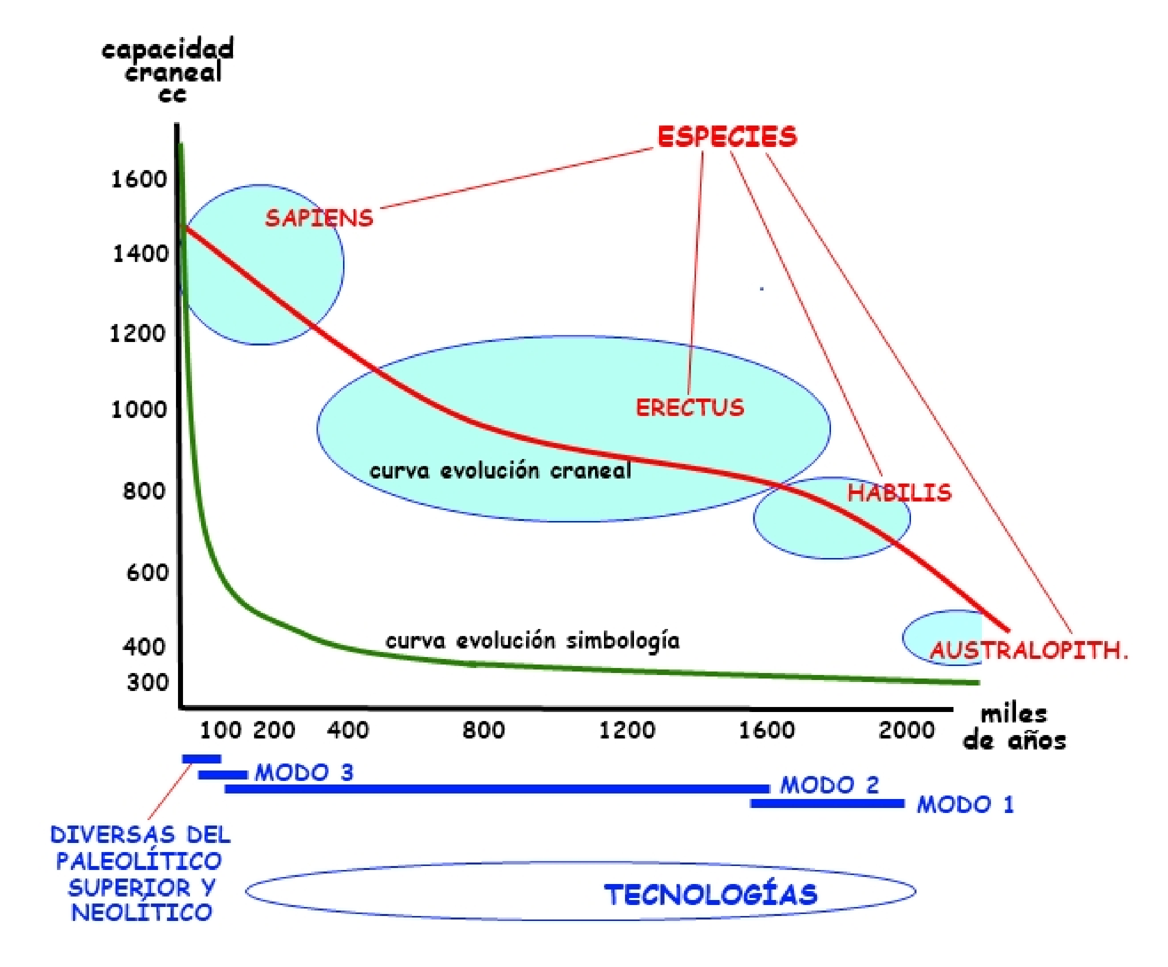
El pensamiento, la conducta y el lenguaje, triángulo del proceso psicobiológico que va a caracterizar la "condición humana"

En resumen: ***Uno**, consciencia y razonamiento; **dos**, simbología y comunicación; y **tres**, relaciones sociales que amplificaban y hacían sólidos los avances*. Lo "humano" y sus motores para el cambio.

Dicho lo anterior nos proponemos seguir su rastro a lo largo del tiempo. En una primera aproximación podríamos decir, como es lugar común en la mente de todos, que lo que nos hace humanos, la inteligencia, la capacidad de razonar, son alforjas que se van llenando poco a poco mientras el cerebro va evolucionando hacia mayores volúmenes y, por tanto, alcanzando mayor capacidad de procesamiento. Estúdiese cómo evoluciona el tamaño craneal de nuestros fósiles y se obtendrá la senda de aprendizaje hacia lo "humano".

Pero la realidad parece contradecir este axioma. Si analizamos conjuntamente, como se puede ver en la figura de la página siguiente, las evoluciones temporales del crecimiento del tamaño craneal, del avance de las culturas (tecnologías) líticas y de las evidencias sobre el uso de simbolismos, vemos que se ha producido

un sorprendente desfase entre lo que suponemos obvio, un “*avance cultural paralelo al tamaño de cerebro*”, y lo que se observa en la realidad.



Esquema a partir de la información del libro de Ángel Rivera Arrizabalaga “Arqueología del lenguaje”, que permite comparar los perfiles del ritmo evolutivo de la capacidad craneal, uso de la simbología y tecnologías del Homo. Se observa el desfase temporal entre el primero y los dos últimos.

La realidad nos enseña que entre el crecimiento del volumen craneal y la manifestación de inteligencia vía los marcadores de cultura y uso de simbolismos hay un desfase de al menos cientos de miles de años. Muy grande en el inicio, cuando los australopitecos y los hábilis, y confundiéndose paulatinamente a medida que el *Homo* se va haciendo más *sapiens*. Esa observación nos afianza en la idea de que la consciencia inteligente no solamente surge de un fenotipo

preparado para ella, sino que debe haber algo más. Ya apuntamos al principio que simbolismo y relaciones sociales debieron ser las otras dos patas de la mesa.

Por tanto, es claro que no era suficiente el tener una máquina adecuada, un hardware -encéfalo- estructuralmente capaz y un software -mente- potente. A esta máquina le hicieron falta miles de años de evolución inmersa en un medio con el que iba coevolucionando. Poco a poco, *acunada por los cambios fenotípicos del cuerpo hominino y por los cambios ambientales*, debieron ir apareciendo manifestaciones de una consciencia. Al principio poco elaborada, para acabar con la maravilla de la capacidad de raciocinio del *sapiens*. Este camino de progresiva emergencia tuvo que tener su reflejo en el comportamiento de los *Homo*'s, que a su vez tiene reflejo en los restos arqueológicos de su actividad, algunos de los cuales son accesibles para nosotros a través de las labores de la paleoantropología.

Este es el reto de la Arqueología Cognitiva: deducir de las evidencias fósiles el desarrollo de lo humano. Tarea multidisciplinaria donde las haya, en donde participan antropólogos, neurólogos, sociólogos, psicólogos, etnólogos, lingüistas…

Son muchos los autores que postulan la hipótesis acerca de que el uso del **simbolismo es la luz de alerta de las capacidades cognitivas** que consideramos humanas. Es la manifestación clara de un pensamiento abstracto: exige un sentimiento de sí mismo y del "otro", un discernimiento del tiempo y el espacio, un código de traducción entre abstracciones del que piensa y comunica con el que recibe, reprocesa la abstracción y entiende al primero.

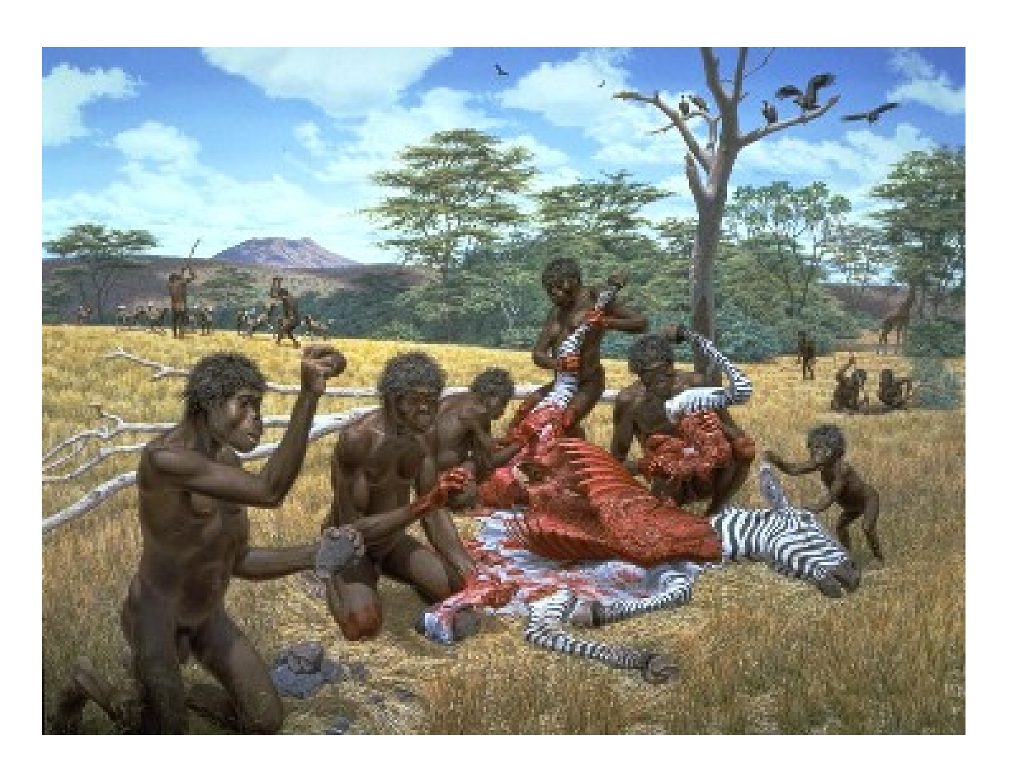
En resumen, perseguir la emergencia de la condición humana es tratar de seguir la evolución interrelacionada, por un lado, de las capacidades cognitivas (cómo evoluciona el cerebro), por otro, de las características del entorno (manifestaciones sociales y evolución morfológica), para acabar con el desarrollo del uso del simbolismo

(herramienta imprescindible para transmitir el conocimiento, de forma que las relaciones sociales permitan su acumulación progresiva en el acervo de la humanidad, imprescindible para el desarrollo cultural).

El relato de esta historia es largo, y siento decir que se aparta del propósito de este libro. En cualquier caso, aquí propongo un relato cronológico sobre lo que creemos que pudo pasar en la realidad. Relato con cierto detalle, aunque, por ajustarme a las necesidades de longitud del escrito, pueda resultar simplista y compartimentado al buscar una mayor claridad esquemática. En la voluntad del lector, como en la de los más expertos teóricos, queda el ponderar en qué momento fue madurando hasta aparecer en el escenario lo que llamamos "condición humana". Desgraciadamente es algo que no fosiliza, como comenté al principio del capítulo.

Comenzaremos con el *Homo habilis* de hace unos 2,5 millones de años.

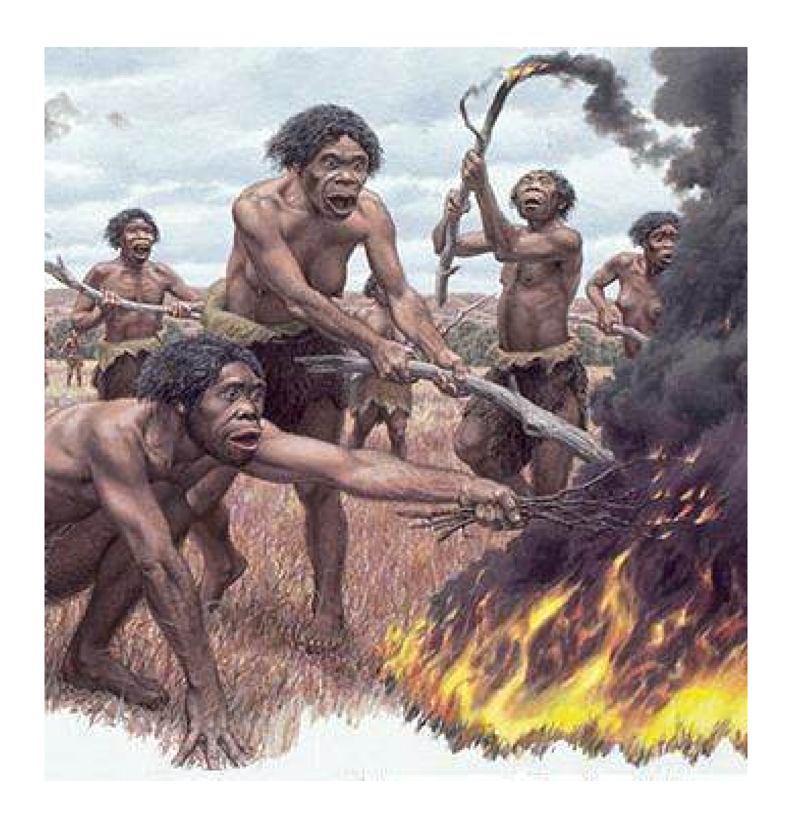
Capacidad craneal de 650 centímetros cúbicos. Inventor de una tecnología lítica precaria, la Olduvayense o Modo 1. Carroñero y cazador esporádico. Sus grupos sociales son pequeños y se desplazaban al albur de la obtención de comida, en cuyo seno se intercambiarían por imitación las habilidades para la gestión inmediata del día a día. Poseían cierto sentido de la previsión, ya que se conocen lugares donde almacenaban la materia prima para sus herramientas, aunque éstas posiblemente fueran de un sólo uso. Fisiológicamente podrían dominar un lenguaje gestual e incluso fonético, aunque muy sencillo. Podemos deducir de todo lo anterior que comenzaban a comprender las abstracciones básicas relacionadas con los sentidos de unidad grupal, espacial o temporal, lo que nos lleva a pensar que el razonamiento de tipo humano ya estaba comenzando a emerger en sus cerebros, pero sin un pleno sentimiento consciente de lo que se hacía.



Representación de una horda de Homo habilis (Imagen: Jay Matternes, fair use)

En el impreciso entorno entre 1,8 y 0,25 millones de años.

Una larga época en la que sucedieron muchas cosas desde el prisma de la fisiología y relativamente menos, a la vista de su extensa duración, desde el prisma de los usos y cultura. Fue una dilatada época a lo largo de la cual vivieron una variada panoplia de especies homininas, desde el *Homo ergaster-erectus* hasta el nacimiento del *Homo sapiens.* Fue también la época en la que el hombre salió de África por primera vez, colonizando Eurasia. Todos aquellos hombres tenían una estructura corporal muy semejante a la moderna, aunque sus capacidades craneales pasaron de los 870 centímetros cúbicos hasta poco más de los 1.000, crecimiento que no afectó principalmente al córtex prefrontal cerebral, lugar donde se gestionan las habilidades superiores del razonamiento humano. Muy al inicio del periodo se produjo un salto tecnológico significativo, al practicar la talla de doble cara del canto rodado, lo que se conoce como tecnología Achelense "bifaz" o del Modo 2, que perduró sin una evolución significativa a lo largo de este millón y medio de años.



Un grupo de Homo ergaster/erectus aprendiendo a dominar el fuego (Imagen: Jay Matternes, fair use)

En la segunda mitad del periodo habrían afianzado el manejo de la abstracción identitaria de tipo social, puesto que comienzan a observarse asentamientos fijos, la socialización del fuego, unas claras estrategias de caza en grupo, como el uso de enceladas, y los primeros petroglifos y figurillas antropomórficas como posible señal de identidad territorial y de grupo. No se conoce ningún tipo de adorno ni sustancia colorante de uso personal que apoye el manejo de la abstracción de tipo identitario individual. En este sentido podemos imaginar también que de alguna manera el salto tecnológico implicaría algún tipo de reconocimiento individual de los artesanos. También podemos intuir en las siguientes circunstancias indicios que parecen apuntar hacia un manejo habitual de la abstracción espacial, aunque a corta distancia. Entre otras: las técnicas de caza, que implicaban la planificación de las celadas sobre los animales; los movimientos necesarios para llevar a cabo los contactos entre las distintas bandas que formaban el grupo reproductor; las evidencias de lugares de almacenamiento de

alimentos o la búsqueda de material para sus herramientas lejos de sus lugares de habitación.

Al haber emigrado a zonas geográficas con una mayor diferencia entre estaciones -Eurasia- estaban obligados a discernir en qué momento había que recolectar determinado fruto o en qué momento la caza acudiría a sus lugares habituales. Todo ello indica una familiarización con el sentido de abstracción temporal, aunque fuera a corto plazo. Estamos hablando de que debían manejarse con soltura en una zona geográfica relativamente próxima, en donde conocerían y podrían describir todo lo que quedaba en su interior con un horizonte temporal que debía abarcar varias estaciones.

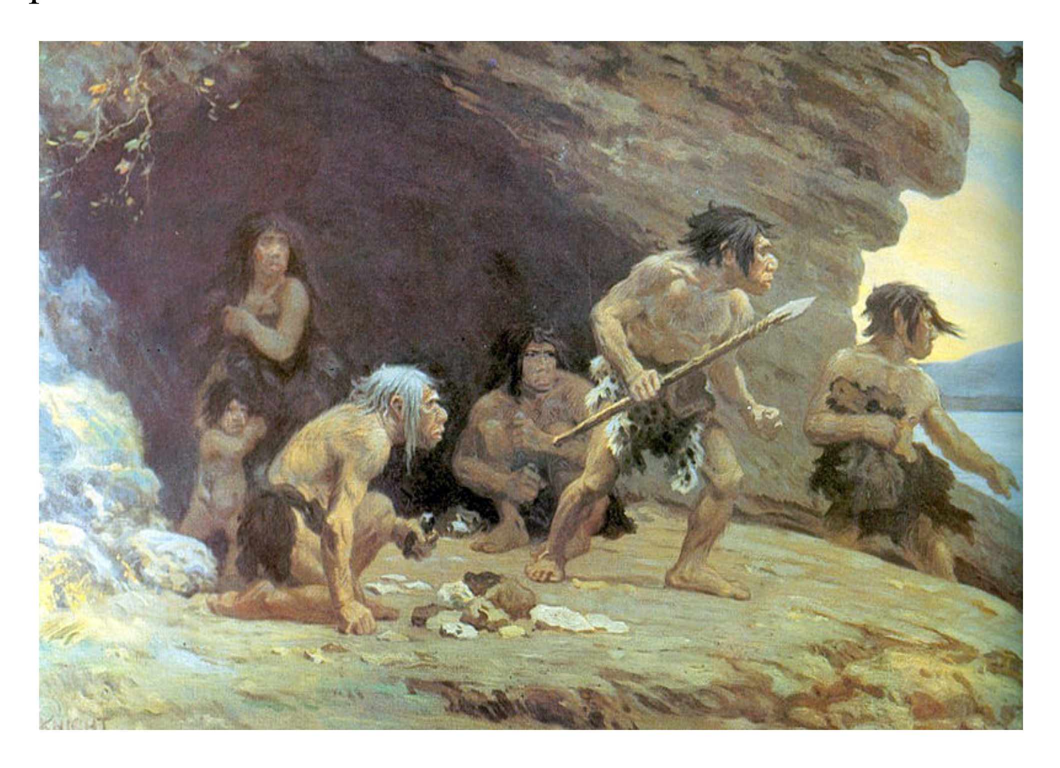
Fisiológicamente estaban bastante bien preparados para modular un lenguaje fonético, aunque acotado por las propias limitaciones del nivel de abstracciones con las que trabajaban sus mentes. Al interiorizarse este lenguaje más rico se fue perfeccionando la capacidad de pensamiento y de intercomunicación con los otros del grupo, a nivel descriptivo de un entorno que sobrepasaba el aquí y el ahora. Sin embargo, a la vista de estas particularidades, aún no habían llegado a niveles de reflexión suficientes como para que hubiera emergido el raciocinio complejo del hombre moderno.

Aproximadamente desde hace 250 mil a los 40 mil años antes de hoy.

Coexisten varias especies de hombres, aunque es el momento en que empieza el itinerario del *Homo sapiens.* Es la época en que a partir de África este último se dispersa por toda Eurasia y hasta Australia, lo que conllevó el declive del resto de *Homo*‘s. Con una capacidad craneal muy por encima del litro y un neocórtex prácticamente desarrollado, tenía la maquinaria suficiente como para que a partir de ellos emergiera con toda plenitud la conciencia reflexiva humana, o lo que es lo mismo, lo que consideramos condición humana. La tecnología lítica dio un nuevo salto pasando a la más sofisticada

técnica Musteriense o de Modo 3, de gran eficacia en el uso de la materia prima y con una gran diversidad de productos.

Todo parece indicar que los grupos humanos en África estarían mejor comunicados, mientras que en Europa, al ser las variaciones climáticas más intensas, incidirían en gran medida sobre las condiciones de habitabilidad en regiones próximas, lo que las conformaría algo así como islas geográficas a efectos de interacciones sociales de los grupos de población establecidas en ellas. Quizás por ello en África se observa un desarrollo cultural adelantado en el tiempo al que se aprecia en los yacimientos europeos.



Grupo de neandertales durante el periodo Musteriense (Wikimedia, dominio público)

Las habitaciones estables y el uso del fuego se van generalizando. Al menos entre los homos de África se aprecian unos cambios en las estrategias de obtención de los alimentos que indican una mayor planificación de las actividades y el aprovechamiento de los recursos marinos. Aparece tímidamente alguna evidencia de adornos

corporales, ya sea por el uso del ocre decorativo o de objetos para este propósito. Aparecen los primeros enterramientos, aunque los expertos dudan de que tuvieran un propósito más allá de una práctica higiénica o de reconocimiento emocional a determinados personajes.

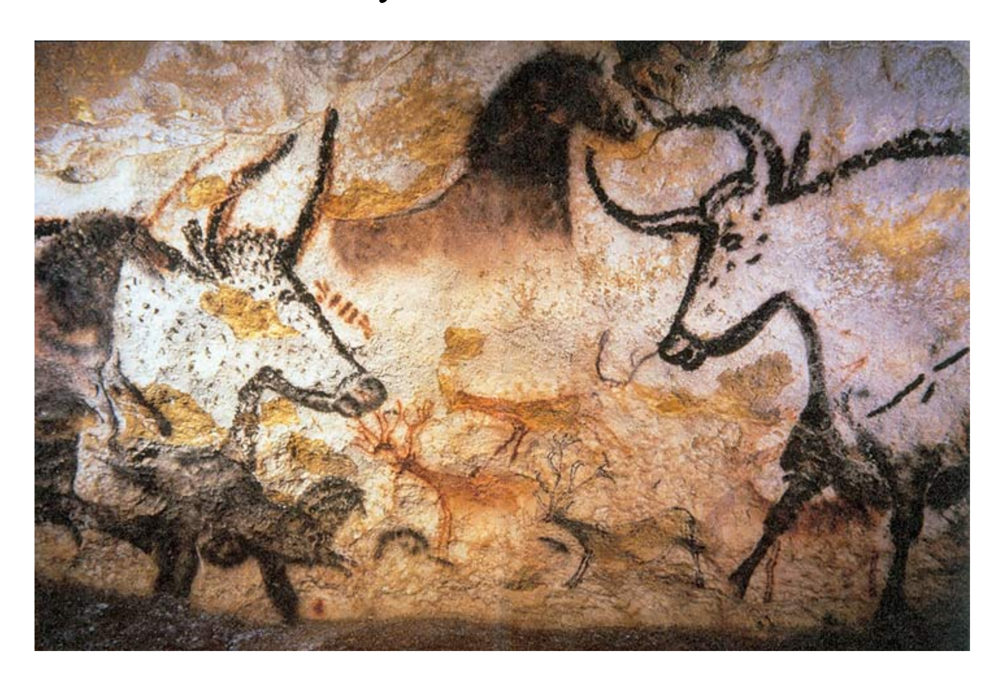
A partir de todo lo anterior podemos intuir cómo el sentimiento abstracto de grupo se habría intensificado, aunque la escasez de adornos nos hace pensar que aún no era necesario fortalecer el sentimiento abstracto de autoconciencia individual, aunque sí se reconocería lo "especial" de algunos miembros del clan. Las abstracciones espacial y temporal, que ya vimos que comenzaban a manejarse con soltura en el periodo anterior, se iban reforzando gracias a la convivencia entre diversas especies y las fuertes relaciones que debían permanecer entre iguales tras unas migraciones tan rápidas como las que se habían producido. El espacio se habría hecho lejano y el tiempo, más que anual.

Dado que ya se disponía de una fisiología preparada para un lenguaje moderno y que se manejaban las abstracciones fundamentales con bastante agilidad, los expertos en Arqueología Cognitiva piensan que aquellos hombres se comunicaban con un rico lenguaje, aunque simplemente con fines descriptivos, con unas capacidades planificadoras y de anticipación que tendrían su reflejo en el proceso de pensamiento. Podríamos decir que aquellos hombres eran inteligentes, aunque sólo para la supervivencia. En ellos aún no había surgido la reflexión necesaria con la que aprovechar las potencialidades racionales de sus cerebros.

La fase crítica: desde el entorno de los 40.000 a los 10.000 años.

El registro fósil nos indica que en la frontera temporal de hace 40.000 años, y en un corto periodo de tiempo, se inició un cambio sustancial en el comportamiento cognitivo y conductual del hombre. Se observa tanto en África como en Eurasia. Es la era de consolidación del *Homo sapiens*.

Comienzan las manifestaciones artísticas con su máxima expresión en las pinturas rupestres, las habitaciones son cada vez más estructuradas, observándose cómo se utilizan de forma recurrente, y comienza la proliferación de adornos personales y de ajuar doméstico. La tecnología del tallado se sofistica con la introducción del uso del hueso o de la madera. Las herramientas producidas son muy variadas. Se va lejos a buscar las materias primas más idóneas y se llevan los productos manufacturados a lugares distantes de los centros de producción. Las técnicas de caza se sofistican también. Los enterramientos tienen ya una clara motivación trascendental.



Manifestación del arte rupestre de las cuevas de Lascaux, Francia, con 14.000 años de antigüedad (Wikimedia, GFDL 1.2)

La geografía empieza a estrecharse, ya que las relaciones entre grupos se hacen muy intensas. Comienzan las rutas de intercambio de bienes. La cultura ya no es puntual, sino que comienza a ser patrimonio de unos muchos que comparten conocimientos, con lo que se inicia tímidamente el edificio del saber universal.

Posiblemente esta circunstancia era la que estaba esperando el cerebro del *Homo sapiens*, que a nivel estructural ya sabemos que estaba prácticamente desarrollado como el de los hombres

modernos, para iniciar el “gran salto adelante”. Ello se estaba produciendo a la par que se iba perfeccionando el lenguaje, al haberse ampliado el acervo común de simbolismos, con el valor añadido de las nuevas abstracciones inmateriales y trascendentales que estaba “descubriendo” la emergente reflexividad: metafísica, magia o religión. Así era el lenguaje que interiorizó la mente, con el que enriqueció su potencia de razonamiento.

Al final del periodo todas estas circunstancias alcanzan un nivel tal que el pensamiento de aquellos hombres debía ser ya plenamente verbal y con un rico manejo de variadas abstracciones. No sólo las tres clásicas de identidad social e individual, de tiempo y de espacio, sino también, como hemos comentado en el párrafo anterior, otras de tipo más trascendental. Se abrían las puertas del pensamiento simbólico, consciente y reflexivo.

A partir de ahí quedó al descubierto todo el potencial implícito en la capacidad y especialización neuronal del cerebro desarrollado de aquellos hombres. Pensamiento y lenguaje habían alcanzado el poder de la argumentación, que les posibilitaba la discusión crítica y razonada sobre las propias vivencias. Se vivía ya en la antesala de la forma de conducta plenamente simbólica, reflexiva y voluntariamente maleable propia del *Homo sapiens sapiens*.

A partir de hace unos 10.000 años.

Se domestican los vegetales y los animales. Y poco más hay que decir. Fue la circunstancia definitiva que necesitaban nuestros *Homos* de pensamiento reflexivo y maleable. Con la agricultura y la ganadería se fija la residencia, se generan excedentes, se asienta el comercio y la escritura. Parte de la población puede alejarse de los procesos productivos directos: se establece la política, lo militar, el pensamiento filosófico, los chamanes y el arte en todas sus facetas. El final tecnológico de la historia es bien conocido.

***

A lo largo de este capítulo hemos podido asistir a la evolución en unos animales muy particulares, desde una mente humana focalizada en la supervivencia hasta otra autoconsciente, reflexiva y maleable, que incluso fue capaz de “inventar” e incorporar al núcleo de su existir unas abstracciones ausentes en la naturaleza, como la idea de un mundo donde los que se habían ido pervivían o donde los dioses manejaban sus vidas. A partir de la llegada de estos individuos al teatro de la Vida ya nada será igual. La especie humana maneja las reglas del juego: la selección natural no será ya la única clave. El *Homo* ha inventado la selección tecnológica, la selección cultural y la selección social mediante las que fuerza la consideración de otros criterios en la lucha evolutiva. Hasta él se premiaba la supervivencia de los mejor preparados para la reproducción. A partir de él, cualquiera al que el destino le haya proporcionado medios y posición social puede tener comparativamente más éxito en el apareamiento, procreación y cuidado de la prole, sea cual sea la fortaleza de su patrimonio genético.

En el capítulo que sigue retomaremos el relato temporal para ver cómo estos hombres fueron capaces de repoblar cualquier espacio vacío del planeta.

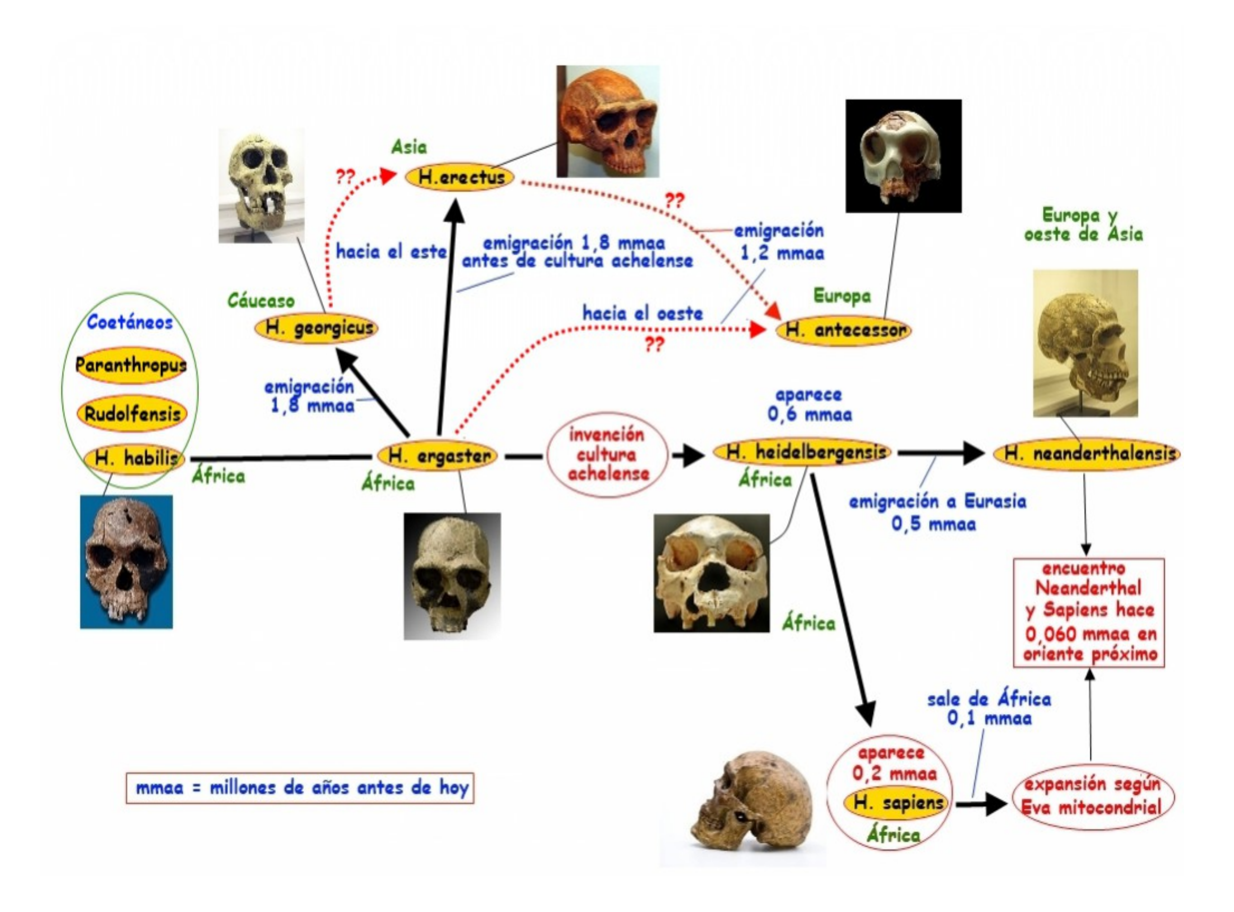
56. La aventura viajera del Homo

En el capítulo anterior habíamos abierto un paréntesis para desarrollar, de forma absolutamente esquemática, cómo los homininos del Cuaternario alcanzaron la condición plenamente humana, como creemos que es la nuestra. La autoconciencia reflexiva, planificadora y previsora. Volvemos ahora al relato cronológico, hilo conductor de esta biografía sobre la Vida, para hablar de cómo los *Homo*'*s*, saliendo de su lugar de origen, lograron poblar el planeta.

¿Cómo se desarrolló la aventura? Debió ser muy compleja, según lo que se conoce hasta ahora a partir de las evidencias fósiles, mediante las que podemos colegir variados esquemas que dibujan los posibles caminos migratorios. Hay que decir que nada hay definitivo, ya que todo queda sometido a lo que los futuros hallazgos y consiguientes estudios paleontológicos determinen. A partir de lo que se habló hace dos capítulos ya sabemos que los homininos, una vez desgajados de sus antiguos compañeros de viaje orangutanes, gorilas y chimpancés, aparecieron en el continente africano en el este de su franja ecuatorial. Pensamos que el camino evolutivo los llevó a través del espacio y el tiempo, conviviendo con otras especies, hasta el *Homo habilis* y de él al *Homo ergaster*.

Hace unos 1,8 millones de años se debió iniciar lo que creemos fue la primera salida conocida del *Homo* fuera de África. Se supone que unos individuos que pudieron ser *ergaster,* o incluso evolutivamente anteriores, emigraron hacia el noreste siguiendo la falla del Rift llegando a atravesar el puente de unión entre África y Eurasia. Se establecieron rápidamente en el Cáucaso, Dmanisi, en donde recientemente se han encontrado fósiles que se han catalogado como

de la especie *Homo georgicus* y datados precisamente en las fechas de la migración, unos 1,8 millones de años. Unos pocos miles de años más tarde, o quizás a la par de la aventura del Cáucaso, cuando el *ergaster* aún no había evolucionado su cultura lítica olduvayense hasta la más desarrollada achelense, se pudo producir de nuevo un desplazamiento geográfico de individuos de esta especie hacia el Próximo Oriente. Llegaron hasta el sureste de Asia, en donde evolucionaron hacia la nueva especie *Homo erectus.* Más tarde, hace 1,2 millones de años, los mismos *erectus,* o quizás de nuevo los *ergaster* africanos en un tercer movimiento migratorio, se desplazaron hacia Europa, en donde hemos encontrado fósiles de sus descendientes (yacimiento de Atapuerca, España) que se han catalogado como de una nueva especie: *Homo antecessor*.

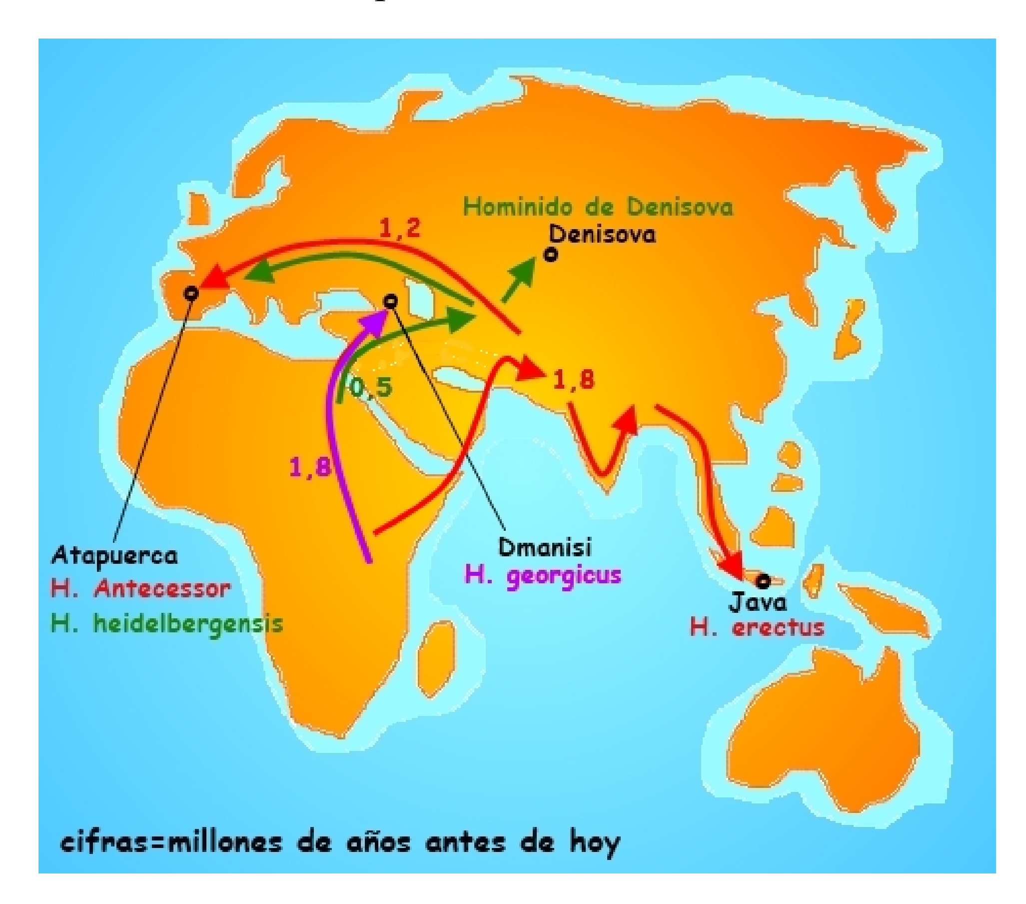


Esquema de las posibles migraciones del Homo, sujeta a incertidumbres interpretativas y lógicas modificaciones según avanza el conocimiento paleoantropológico

¿Por qué este afán viajero en aquel momento? ¿Se dieron unas circunstancias climáticas durante las cuales los recursos menguaron? A pesar de que la población era escasa en aquella época, cosa que ya sabemos de lo leído en otros capítulos, pudiera ser que la precariedad de alimentos motivara el cambio de asentamientos. La coyuntura coincide con el *periodo glaciar Donau* (1,8 millones de años) por lo que en aquellos momentos se estaría viviendo un clima condicionado por una atmósfera más seca. Las praderas africanas se habrían desertizado, trasladándose a latitudes superiores. Al haberse incrementado los depósitos de nieve y hielo habrían quedado al descubierto los pasos marinos entre África y Asia, permitiendo el tránsito a pie enjuto entre ambos territorios. Se sabe que el movimiento por Asia se hizo de forma muy rápida, ya que en pocos miles de años habían llegado hasta la isla de Java. A razón de un kilómetro por año lo pudieron conseguir en 15.000 años. Por ello parece plausible pensar que a medida que el clima del momento iba empobreciendo los lugares habituales de vida, paulatinamente se fueron desplazando desde África hasta Asia. Lo harían siguiendo los movimientos de las manadas de grandes animales que también eran empujados por la búsqueda de vegetales sustitutivos de los habituales en sus dietas, a través de una amplia franja geográfica más septentrional pero de características no muy diferentes a las que habían sido las ordinarias en sus puntos de origen.

Mientras, en África, el *Homo ergaster* que había permanecido allí siguió evolucionando hacia unas nuevas formas conocidas como *Homo heidelbergensis* y *Homo rhodesiensis* y a una nueva cultura de talla lítica más evolucionada, la achelense. Se cree que unos individuos de alguna de estas últimas especies de *Homo* viajaron hacia Eurasia por los mismos caminos anteriores, en un nuevo desplazamiento geográfico hace medio millón de años, durante la *glaciación de Mindel* cuando el hielo alcanzó su mayor extensión. Allí evolucionaron hacia nuevas especies: *Homo neanderthalensis*, el homínido de Denisova y posiblemente aún una tercera especie más, de la que sólo se tienen indicios por su genoma. Se cree que los heidelbergenses que quedaron en África fueron los precursores de

Homo sapiens. Allí precisamente se encuentran sus primeras evidencias datadas en hace unos doscientos mil años. Con ellos se inició una nueva fiebre repobladora.



Esquema aproximado de lo que pudieron ser las primeras migraciones del Homo fuera de África

La expansión de la nueva especie *Homo* se inició desde algún lugar del África oriental hace entre 160 y 135.000 años. Las primeras radiaciones fueron para poblar el continente hacia la cuenca del río Congo, Golfo de Guinea, Sudáfrica y el altiplano de Etiopía. Poco después, en el entorno de hace 125.000 años, se vivió un periodo interglaciar durante el cual la atmósfera se hizo más húmeda y cálida. El resultado fue que el Sáhara se convirtió en un vergel por donde los *sapiens* de Etiopía se desplazaron descendiendo por el valle del Nilo. Algunos colonizaron la costa norte africana mientras que otros salieron del continente por la vía del Sinaí llegando al Próximo Oriente en el este mediterráneo, donde se asentaron. Más

tarde, hace unos 115.000 años, el clima volvió a cambiar al aparecer una nueva glaciación, la de Würm, que secó la atmósfera devolviendo de nuevo al norte de África unas condiciones desérticas. Los *Homo*‘s que vivían en el levante mediterráneo quedaron allí atrapados entre el frío del norte y la sequía del sur. Y desaparecieron. En la cueva de Qafzej y en Skhul (en territorio del actual Israel) se han encontrado enterramientos humanos de hace unos cien mil años. Su lugar fue ocupado por una especie mejor preparada para condiciones de bajas temperaturas: vinieron del norte y eran los neandertales. Pero no todo debió ser malo para los *sapiens* ya que el esplendor de los glaciares de esta última glaciación una vez más había hecho descender el nivel de las aguas marinas, lo que abrió pasos firmes entre África y Asia a través del mar Rojo y el sur de Arabia. Por estos puentes terrestre el *Homo sapiens* inició, en el entorno de hace 100.000 años, la colonización del sur de Asia siguiendo la costa y viviendo de los productos que les proporcionaba el mar. Se conocen algunas de sus pistas encontradas en yacimientos del sur de China: una mandíbula de 110.000 años en la cueva de Zhiren que correspondería a *sapiens* con ciertas características arcaicas. Y lo que es más sorprendente, medio centenar de dientes con una morfología que corresponde a individuos *sapiens* modernos, con una antigüedad de entre 120 y 80 mil años, en la cueva de Fuyan en Daoxian. Su descubrimiento reportado [1] en 2015 ha suscitado grandes preguntas ya que quizás el *Homo sapiens* moderno abandonó África antes de lo que se pensaba. Bien pudiera ser que todos los hombres modernos que actualmente vivimos fuera de África provengamos de alguno de estos pequeños grupos aventureros.

El clima del Pleistoceno siguió con su perfil de montaña rusa, de forma que hace 52.000 años hubo un nuevo repunte de la temperatura global con un incremento de entre siete y diez grados. Parece que desde Asia, en territorios que actualmente son el norte de India y Pakistán, los humanos modernos se dirigieron rápidamente hacia Europa. En los Balcanes hay asentamientos de más o menos 45.000 años de antigüedad, como el de Bacho Kiro, Bulgaria.

Tardaron muy poco en llegar al extremo occidental europeo, a la península Ibérica (yacimientos catalanes de L'Arbreda y del Abric Romaní de 40.000 años de antigüedad), y a la mayor parte del Asia climatológicamente habitable (llegan a Australia hace más de 40.000 años). Habían puesto un definitivo pie en Eurasia.

Las pistas genéticas

El camino migratorio que dibuja el rastro fósil ha podido ser analizado con más exactitud a través de técnicas de análisis genéticos. Ésta es la historia de la **Eva mitocondrial**.

Cuando en los primeros capítulos hablábamos de las células y su aventura hacia formas complejas que dieron como resultado las eucariotas con núcleo, hablábamos de las mitocondrias, auténticas factorías celulares en donde se gestiona su infraestructura energética. Y también decíamos que las mitocondrias eran los vestigios de alguna bacteria en simbiosis con otra célula procariota hospedante. La mitocondria ha logrado mantener parte de su original acervo genético, que se transmite de generación en generación **de las madres** a sus descendientes, sin mezclas ni divisiones -los espermatozoides paternos no transmiten sus mitocondrias al gameto-. Sólo de vez en cuando se produce un cambio en forma de alguna alteración de un nucleótido en uno de sus genes, una mutación que perdura en el tiempo. Los genes mitocondriales no están sometidos a recombinación durante la meiosis de los gametos, como les sucede a los del ADN nuclear. Así pues, **como conjunto** son "eternos", mientras que los nucleares no, ya que se transmite a la descendencia mezclando el de madres con el de padres. De aquí que resulte más claro realizar cualquier rastreo sobre la historia de los genes mitocondriales, pues siempre son los mismos "personajes", que sobre los del ADN nuclear.

Y esto es lo que se ha hecho con los de los *Homo*'s. El rastreo nos ha llevado aguas arriba hasta una madre común a todos los hombres, madre que se los pasó a sus hijas, que a la vez lo hicieron con las

suyas y así hasta hoy. A esta madre es la que simbólicamente se le ha bautizado con el nombre de *Eva mitocondrial*. El trasfondo del nombre *Eva* es esencial en este concepto ya que se trata de *una única madre ancestral de todos los humanos actuales*. Y esto no quiere decir que en su época sólo existiera esta mujer, quiere decir que las otras mujeres, en sus árboles de gestaciones, llegaron en algún momento a tener sólo hijos varones o hijas sin descendencia, es decir se cortó la vía madre-hija de transmisión genética mitocondrial.

El rastreo hacia atrás en el tiempo se basa en lo que llamamos el **reloj biológico molecular**,[2] que es algo sustentado en la sorprendente, a primera vista, propiedad de que las mutaciones en cada tipo de gen se producen en el tiempo *con una frecuencia -media- constante*, igual a la que se precisa para extenderse esta mutación a toda la población.

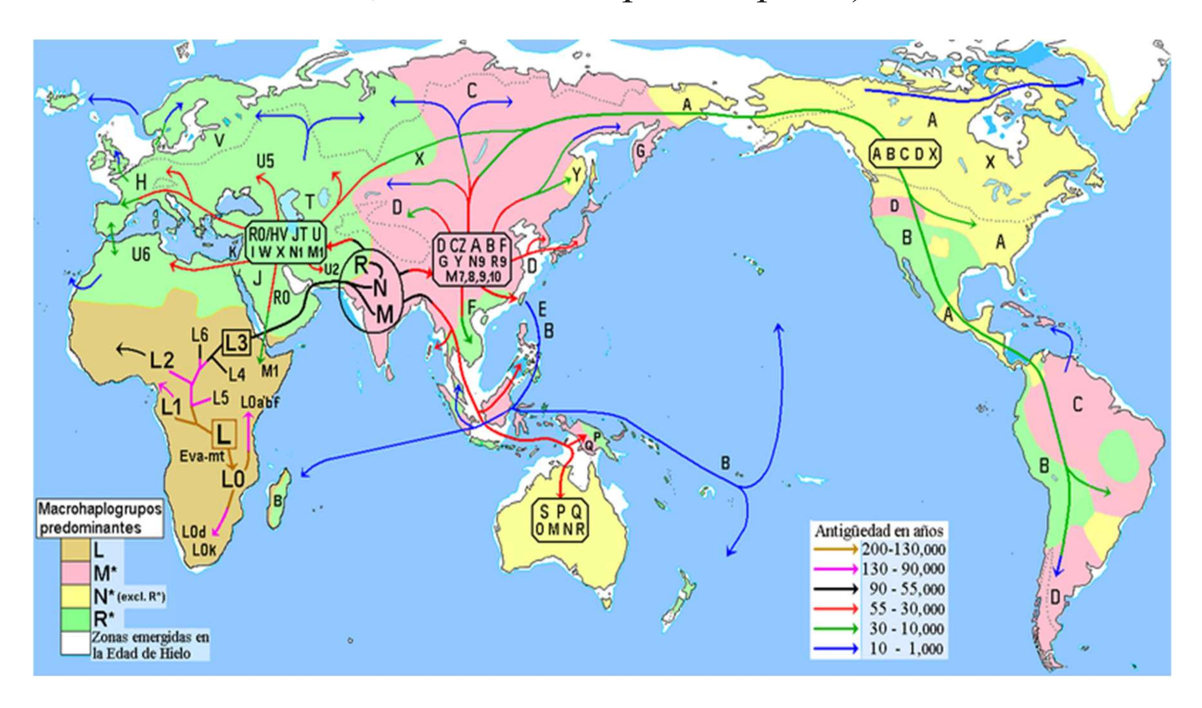
La consecuencia práctica es que si se analiza un gen determinado, el mismo, en una población de caucásicos y en una población de indios americanos, por ejemplo, y se determina el número de mutaciones en las que se diferencia el gen en ambas razas, se puede deducir el número de años hacia atrás en que se inició su divergencia genética, o lo que es lo mismo, el número de años atrás en que vivió el ancestro común. Simplemente como un ejemplo aclaratorio supongamos que el ritmo de mutaciones en este determinado gen en estudio es de una cada 50 mil años y que el análisis genético ha dado una diferencia entre ambas razas de 2 mutaciones. Está claro que estamos hablando de 100 mil años (50.000 x 2), pero que al haberse producido a lo largo de dos caminos desde un punto de bifurcación común, este momento inicial se encuentra en el punto medio del periodo, es decir, en hace cincuenta mil años. Y al igual que se puede rastrear el tiempo, se puede rastrear las relaciones territoriales y por tanto la geografía del origen.

Dicho lo anterior, que no deja de ser un simple ejemplo teórico, complemento la información con el parámetro que es utilizado en algunos análisis técnicos [3] y que corresponde a una tasa de

mutación del ADN mitocondrial humano en el entorno del 2-4% por cada millón de años. Tengo que decir también que las tasas de mutación del genoma mitocondrial son especialmente elevadas, quizás consecuencia de su pasado bacteriano.

Hay que aclarar que hay que seleccionar para su estudio, de entre todos los genes, aquellos que son "transparentes" a la selección natural. Es decir, aquellos que, aun mutando, estas mutaciones son indiferentes a la selección natural de forma que ni se favorecen ni se eliminan, con lo que su ritmo de mutación es muy independiente y queda marcado por una cadencia temporal más o menos uniforme.

Ésta es la técnica, y con ella se ha establecido, analizando genes mitocondriales, que la Eva mitocondrial vivió aproximadamente hace 150 mil años en África. Dato que apoya fuertemente la tesis de que el primer *Homo sapiens* surgió en este continente hace entre 200 y 100 mil años (evidentemente el análisis se ha hecho sobre genes de hombres actuales, todos de la especie *sapiens*).



Migraciones del Homo sapiens y zonas dominantes de determinadas familias de alelos de acuerdo a estudios genéticos mitocondriales (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

El mapa anterior resume el resultado de los estudios genéticos realizados con las técnicas y propósitos anteriores. Las letras mayúsculas son la nomenclatura que representa a los principales alelos de genes mitocondriales estudiados.

El grupo de genes, *haplogrupo*, mutantes más ancestral es el L0, con unos 150 mil años y que es muy común entre los bosquimanos y demás grupos del **África** oriental. Sus mutaciones se difundieron por el resto de África. La tercera generación, los L3, salieron del continente hace unos 65 mil años y se dirigieron con gran probabilidad hacia la India formando allí el núcleo germinal que pobló el resto del mundo. Como ya hemos comentado anteriormente, es probable que desde el Cuerno de África pasaran por un istmo temporal que cerraba el estrecho Bab el-Mandeb hasta el actual Yemen, llegando luego a la India. Desde allí, las siguientes mutaciones se diversificaron hace entre unos 50 y 40 mil años, en tres direcciones. La sur que llegó por Indonesia hasta **Australia**, con extensiones hace unos cinco mil años hacia las islas de Polinesia, islas asiáticas del Pacífico, excepto Japón, y la africana Madagascar. La ramificación del este se dirigió al **Asia** oriental en donde mutó de nuevo desplazándose más tarde una rama hacia el norte de forma que atravesó el Puente de Beringia hacia **Norteamérica** hace unos 15 mil años -y a través del istmo de Panamá, mucho más tarde, hasta Sudamérica- y que también con posterioridad pobló Siberia. La tercera ramificación se dirigió hacia el Próximo Oriente, donde volvió a mutar radiando hace unos 45 mil años hacia toda **Europa**, ocupando el terreno del norte a medida que se retiraban los hielos, y también emigró hacia el norte de África ocupando el Magreb y de vuelta hacia Etiopía, vía la península arábiga.

Esto es lo que dicen los genes mitocondriales.

Los estudios [4] hechos a partir de los genes del cromosoma Y humano -en particular del halogrupo A y en concreto el A1a-, que se transmiten exclusivamente de padre varón a hijo varón, llevan prácticamente a la misma conclusión. Tengo que apuntar no obstante

que alguna de las últimas publicaciones [5] sobre el tema cuestionan esta idea al retrotraer el origen de un linaje “protosapiens” a fechas mucho más anteriores. Vamos a explicar la aparente contradicción.

Dicho haplogrupo A se había considerado desde siempre como la rama más antigua de los patrilinajes humanos, sin embargo se ha demostrado que incluye también evoluciones un tanto raras y ancestrales: la A1a, la A0 y la rarísima A00, todas ellas con un origen en hace unos 380.000 años, más antiguas que la A incluso. Es decir ¡que serían muy anteriores a la fecha de aparición del *sapiens* dictada por el genoma mitocondrial! Sin embargo en un estudio del año 2011 [6] realizado por el biólogo Michael F. Hammer y colaboradores se sugiere, apoyándose en evidencias muy plausibles, que estos halogrupos tan raros podrían ser consecuencia de alguna hibridación con especies de homos africanos pre-sapiens, no muy lejanos al *Homo sapiens*. Al excluir de la “pureza” evolutiva a las ramas A1b y A0, los biólogos consideran que se puede permitir el mantener el criterio científico que iguala las historias de la Eva mitocondrial y el Adán del cromosoma Y. No dejaría de ser un caso más en el que a lo largo de la expansión de una especie que va a llegar al futuro, ocasionalmente se había hibridado con otras que se quedaron en el camino. Un caso conocido por lo mediático sería la hibridación cierta entre el *Homo neanderthalis*, el homínido de Denisova y el *Homo sapiens*, que comentamos en el capítulo 53 “*Desde el primer hominino hasta el Homo sapiens*“.

Las razas

Antes de cerrar este tema se necesita hacer un apunte sobre una de las consecuencias de la diseminación del hombre sobre la total geografía del planeta: la aparición de las razas. Los resultados de los estudios biogenéticos comentados en los párrafos anteriores parecen corroborar que el hombre moderno nació en África y lo hizo “una sola vez”. Luego las razas como manifestaciones diversas de su fenotipo han tenido que provenir de esta única semilla ancestral africana y no han sido el resultado de unas paralelas evoluciones

"provinciales" independientes. De hecho, se constata que el genoma humano no varía significativamente entre razas, no más de lo que puede variar el genoma entre individuos en general. Y en esta bolsa del acervo genético del hombre, la que fija las *diferencias entre individuos*, sólo un 15% aproximadamente corresponde a *diferencias de raza* siendo el otro 85% atribuible a otras circunstancias. Y es más, este 15% de diferencias raciales afectan casi todas exclusivamente a la morfología externa, aquello que nos hace diferenciar a simple vista a individuos negroides de individuos mongoloides, por ejemplo.

Es por ello que las teorías más reconocidas sobre razas aseguran que las diferencias observadas son consecuencia, por un lado, de las adaptaciones a las condiciones ambientales de la región donde cada raza se desarrolló, y por otro lado como consecuencia de una selección sexual: las modas imperantes en un grupo humano pudieron decantar los rasgos de sus individuos hacia los que más se valoraban en aquella sociedad. Lo que descabalga cualquier idea de ventaja genética o de habilidades racionales entre razas.

En el entorno de esta última idea queda la realidad de que las razas que pudiéramos considerar más avanzadas, siguiendo la simple fotografía de la realidad actual, lo fueron porque estaban en el sitio oportuno y en el momento temporal oportuno ANTES de que las otras, que vinieron culturalmente por detrás, pudieran estarlo. Está demostrado que en aquellas zonas geográficas de nuestro planeta donde antes prosperaron los animales y las plantas domesticables, con más prontitud sus poblaciones tomaron el tren del desarrollo y del poder. Al resto no les quedó más remedio que ir a remolque. Recomiendo al respecto la lectura del libro "*Armas, gérmenes y acero*" de Jared Diamond.

****

En este punto del relato, justo al comienzo del esplendor del *Homo*, podríamos decir que ya tenemos el trabajo acabado y que, por tanto,

con esto queda clausurada esta larga mirada sobre la biografía de la Vida. Lejos quedan aquellos átomos danzarines acreciendo un disco planetario, aquellas moléculas simples y primitivas cooperando bajo la tutela de las fuerzas termodinámicas y físicas, el mundo del ARN, la célula con núcleo, los primeros organismos… un larguísimo camino hasta llegar al *Homo sapiens sapiens*.

Sin embargo, aún me quedan cosas por decir. Después de todo lo leído acerca de esta aventura de 4.500 millones de años, en mi cabeza no dejan de dar vueltas un sinfín de ideas relacionadas con el sentido de esta historia. Y aunque sé que muchos dirán ¡¿y a mí qué me importa lo que imagine este escritor?!, me voy a atrever a daros la lata con mis reflexiones. Me apartaré un poco del sustrato científico que he procurado seguir hasta ahora para situarme en la "*frontera*". Pido disculpas desde hoy, pero me lo pide el cuerpo como último razonamiento personal a lo que me parece un infundado antropocentrismo. Esto será el objeto del siguiente capítulo.

NOTAS DEL CAPÍTULO 56:

1. Encontraréis la información sobre este descubrimiento en la publicación de la revista Nature de octubre de 2015, "*The earliest unequivocally modern humans in southern China*", Wu Liu et al.

2. En genética, el **reloj molecular** es una técnica para datar la divergencia de dos especies. Deduce el tiempo pasado a partir del número de diferencias entre dos secuencias equivalentes de ADN.

3. Como éste de la revista Nature publicado en enero de 1987. "*Mitochondrial DNA and human evolution*", Rebecca L. Cann et al.

4. Como éstos de la revista Science de agosto de 2013, "*Sequencing Y Chromosomes Resolves Discrepancy in Time to Common Ancestor of Males Versus Females*", G. David Poznik et al., o

"*Low-Pass DNA Sequencing of 1200 Sardinians Reconstructs European Y-Chromosome Phylogeny*", Paolo Francalacci et al.

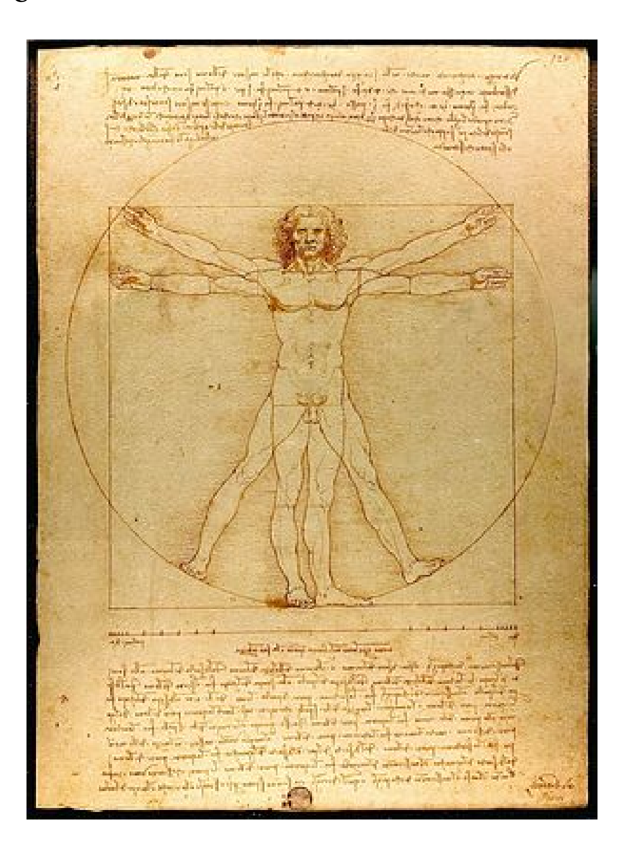
5. Como ésta de The National Center for Biotechnology Information de junio de 2011, "*A Revised Root for the Human Y Chromosomal Phylogenetic Tree: The Origin of Patrilineal Diversity in Africa*", Fulvio Cruciani et al., o esta otra de la revista Science de Agosto de 2013, "*An African American Paternal Lineage Adds an Extremely Ancient Root to the Human Y Chromosome Phylogenetic Tree*", Fernando L. Mendez et al.

6. Como éste publicado en The National Center for Biotechnology Information en Agosto de 2011, "*Genetic evidence for archaic admixture in Africa*", Michael F. Hammer et al.

57. Reflexiones

Queridos amigos lectores:

Estamos dando los últimos coletazos de esta historia sobre la biografía de la Vida. En el capítulo anterior me despedí de la historia evolutiva con la gran aventura de la colonización del planeta por los individuos de una especie que, hoy por hoy, parece poder manipularlo todo, incluso su medio ambiente, de una forma meditada y planificada: nos hemos puesto la matrícula de *Homo sapiens sapiens* ¿Doblemente sabio? Los humanos somos la repera.



Hombre de Vitrubio dibujado por el magistral Leonardo da Vinci, símbolo de la simetría básica del cuerpo humano y, por extensión, del universo en su conjunto (Wikimedia, dominio público)

Pero también amenazaba con emitir una serie de reflexiones personales. Y aquí están. No puedo apoyarlas con pruebas empíricas, por lo que se mueven rozando el perímetro de la casa de la Ciencia ¿Pensamientos más propios de la filosofía? Dejémoslos en simples reflexiones de un primate. Espero que los que hasta aquí habéis llegado y os encontráis leyendo estas líneas me perdonéis el atrevimiento. No veáis fundamentalismo de ningún tipo. Ni antifundamentalismos. Son simplemente temas acerca de lo que aconteció al hombre como sujeto racional, temas que me hacen pensar.

Dicho esto, el que quiera proseguir, que siga adelante. El que no, será igualmente bienvenido al final del paréntesis. Así que no me queda más remedio que abrirlo….

(

En el capítulo 55, que titulé "*El corazón de la evolución humana*", hacía unos breves apuntes acerca del camino del *Homo* hacia lo "sapiens": la emergencia de la autoconciencia reflexiva. Allí apuntaba también la novedosa incursión de aquellos hombres en el mundo metafísico, incursión que perdura hasta hoy, para muchos considerado como la expresión definitiva de lo que nos hace diferentes del resto de compañeros del planeta.

Pero, además, parece como si existiera un escalón cualitativo adicional, algo que añade una especie de destello luminoso al pequeño brote que representa la especie humana en el árbol filogenético: ¿qué podemos decir de las emociones?, ¿cómo aparecen el pensamiento ético y las normas de conducta morales?, ¿es capaz el cerebro racional de "inventar" estas emergencias metafísicas dentro de un normal proceso evolutivo? Tengo que confesar que no tengo respuestas, a pesar de que a lo largo de nuestra historia muchos hombres de pensamiento brillante han intentado buscar la solución. Incluso algunos aseguran haberla encontrado. Aunque, repito, no tengo respuesta concreta que ofrecer a mi

razonamiento, no tengo duda en que debo ser fiel a y consciente de lo que contemplo, apoyado en el patrimonio del conocimiento científico.

Hace poco contemplé una fotografía que personalmente me impactó. Es la que sigue más abajo. Un grupo de chimpancés asiste desolado a la imagen que ocurre ante sus ojos. Es el último adiós a Dorothy, una de sus compañeras de grupo que acababa de morir. Sucedió en 2009 en el Centro de rescate para chimpancés Sanago-Yong.

La similitud con un duelo humano es tremenda. No pretendo que la foto de la página siguiente constituya una prueba científica sobre los posibles sentimientos de los animales y su grado de racionalidad. Quizás fuera la manifestación de una mera curiosidad. Aunque también muy bien pudiera ser la expresión de un sentimiento de empatía con Dorothy y el grupo, heredada de un ancestral antepasado, del que los humanos habríamos recibido también estas emociones y sentimientos de reciprocidad y solidaridad. Una pieza más del natural devenir evolutivo.



(foto: Monica Szczupider, IDA-Africa, fair use)

Porque personalmente me resulta difícil que la cadena "*percepción / emoción / reacción*", "*veo el lobo / me asusto / echo a correr*", se asimile a "*materia / espíritu / materia*" cuando realmente hay una explicación que no precisa romper la cadena de realidad química desde el principio al final. Si no fuera así ¿cuál es el soporte real que enlaza "*veo un niño enfermo*" con "*me emociono y debo cuidarlo*"? La frontera de lo material con lo inmaterial no existe y resulta imposible imaginar qué es lo que pueda rellenar y conectar a dos mundos que por definición son de imposible conexión por tratarse de entidades con dimensiones tan diferentes. Una que consideramos real y tangible; otra, abstracción del cerebro humano.

Sin entrar en demasiadas profundidades, lo que observamos nos lleva a la certeza de que sí hay una unión exclusivamente material: los afrodisíacos animan el sentimiento del amor, los tranquilizantes ayudan a soportar el sentimiento de la depresión y tristeza, el alcohol da valentía a la timidez ¿Qué pasaría si no tuviéramos los sentidos que nos conectan con el exterior? ¿Tendríamos la percepción del Yo? La respuesta creo que debe ser "no".

Pero no nos olvidemos de que la ciencia neurológica nos empieza a dar explicaciones. Las emociones son una sofisticación evolutiva (y yo diría que léxica humana) de los principios básicos de la homeostasis. El delicado equilibrio químico de lo vivo está pastoreado desde sus inicios por realidades contrapuestas que los hombres definimos como *agradable-desagradable*, *premio-castigo* o bien *dolor-placer*. En el fondo es lo mismo: huir del peligro, ser atraído por lo beneficioso. Y lo que en principio se conseguía en una bacteria mediante la acción de una simple molécula química, ahora se traduce en un complejo proceso químico que llamamos emociones. El cuerpo (particularizaríamos para el hombre) tiene sus "antenas" que monitorean tanto el exterior como el propio interior. Estas señales son recibidas en zonas específicas del cerebro (el tálamo y las cortezas sensoriales, entre otras) y tratadas en otras que las evalúan (la amigdala, la ínsula anterior y la corteza prefrontal ventral, las cuales están perfectamente interconectadas). A partir de

la evaluación (que el pensamiento humano ha nominado como emociones: miedo, ira, tristeza o disgusto) se generan respuestas somáticas, ya sea mediante cambios químicos (hormonales por ejemplo), alteraciones del aspecto externo (sonrisa…) o disparando respuestas motoras (correr…), que son lo que sentimos. Y lo que es altamente significativo, estas respuestas son comunes para la práctica totalidad de los animales.

Eso nos dice la ciencia. Pero lo que nos dice también nos permite pensar que esta universalidad de las expresiones emocionales dibuja claramente un proceso automático. Y todo ello nos explica un origen basado en el proceso de selección natural.

Con el tiempo la cadena natural *emoción-respuesta somática* llegó también a los homos. Si recordamos a aquellos hábiles de hace más de dos millones de años y recordamos también lo que su conducta nos permitía inferir, no me resulta difícil pensar que en la cadena de los homo's que los sucedieron en algún momento surgió un **elemental código de conducta**, basado en la conveniencia del bienestar personal y de grupo como elemento de supervivencia. Simplemente eran un refinamiento evolutivo de los intereses de una homeostasis compleja en unos organismos complejos, dirigida una vez más por la ancestral dualidad *premio-castigo*, traducida somáticamente como *agradable-desagradable*.

A pesar de que la Arqueología Cognitiva nos indica que la autoconciencia aparece con posterioridad al *Homo habilis*, no me resulta difícil imaginar (aunque la imaginación sola no sea algo muy científico) que ya en estos primitivos homos se iluminara una cierta inspiración, impulsada más por necesidades vitales que racionales: algo así como: "*La colaboración me va bien, si los otros colaboran me va bien, colaborar me hace encontrar mejor. Siempre que "pecho manchado" se comporta así resulta que las bayas se multiplican y hoy le ayudé a coger las suficientes para todo el grupo. Tengo que imitar su magia. Si hay un colega que tiene más, me viene bien el que me lo ceda en un momento de necesidad, pero no lo hará*

si yo racaneo a la contra. El otro día mi compañero me ayudó cuando vino la leona, sin él se habría llevado a mi cría".

¿Cuál fue el momento en que surge el código de conducta? Nadie lo sabe y posiblemente nadie lo sabrá jamás. Como otras veces he dicho, la mente no fosiliza. Podemos seguir las pautas que sugieren las conductas de los homininos, observables a partir de sus restos fósiles y arqueológicos: la arquitectura craneal, la tecnología usada y la evolución cultural entretejiéndose a lo largo de un proceso continuo, un *continuum,* como lo expresan los expertos en arqueología cognitiva.

En el camino se iba gestando la realidad de unos individuos con unas mentes autobiográficas, conscientes de la propia individualidad y de la del "otro"**,** inmersos en un medio a la vez ajeno y propio, que podían manejar. El hombre racional y reflexivo.

La creciente cooperación social, el vivir un día a día de objetivos comunes, aunque fueran exclusivamente los vitales de aquí y ahora, tuvo que llevar necesariamente a los *Homo sapiens*, o quizás ya había llevado con anterioridad a los neandertales, a compartir unos nuevos valores -¿instintos racionales?, a este nivel ¿cuál es la diferencia?- comunes de supervivencia y bienestar. A los hombres modernos nos gusta llamar a estos valores *emociones sociales* -empatía, compasión, vergüenza, lástima, culpa, desdén, celos, envidia, orgullo, admiración-. En su conjunto configuraron una serie de normas de conducta ¿llamémosle moral? que entendían del bien y del mal, de lo que conviene o no conviene, siempre presente el patrón homeostático *placer-dolor*, dentro de un sistema social complejo, ¿cómo no pensar que con estos mimbres debió resultar inevitable el desarrollar un código universal de comportamiento de lo que está bien y lo que está mal, una base **ancestral de reglas éticas**? ¿Éticas? Sí, entendiendo lo ético como un sentimiento genérico que dirigía el comportamiento con un propósito vital: un existir más llevadero y feliz. O copiando palabras del conocido neurólogo portugués Antonio Damasio: "*Las emociones sociales*

incorporan una serie de principios morales y forman una base natural para los sistemas éticos".

En resumen: todo me lleva a pensar que los humanos tan sólo somos unos organismos animales más, puro juego de la química y la evolución, y que nuestras emociones que nos impulsan y los valores éticos que nos orientan no son más que un simple momento puntual, uno más, del universo.

Y cierro paréntesis

)

El camino de esta extensa biografía de la Vida ha sido largo y azaroso, pero, al fin, podríamos pensar que la Tierra había parido a su hijo, que el propósito se había hecho realidad. Sin embargo, después de la lectura de todas las palabras, desde la primera de este escrito, de lo único que podemos estar seguros -¿podemos estar seguros de algo?- es que el *Homo* es un hijo más de la Tierra y nunca su elemento clave. La carrera de la evolución continúa y nuestra especie sigue estando sometida a ella; ¿cuál será el fin? Queda en manos del futuro.

De todas formas, las reglas del recorrido a partir de hoy no serán muy distintas a las del pasado. La presión medioambiental, con su complejidad y variabilidad, seguirá dibujando los meandros en el discurrir futuro de la Vida. Como ya lo hizo cuando el *Lystrosaurus*, aquel reptil mamiferoide que concentró el éxito de la salida de la crisis del Pérmico/Triásico,[1] claro vencedor del infierno, dominador de los espacios quemados. Poco le duró la alegría, ya que los dinosaurios le ganaron la mano y lo expulsaron a las cavernas subterráneas. Reptiles 1 – Mamíferos 0. Los avatares del Universo también robaron este esplendoroso éxito de los dinosaurios ¡todos hubiéramos apostado por ellos! Pero una gran piedra de 10 kilómetros los degradó para siempre, condenándolos a la extinción, que no al olvido. Los ratoneros mamíferos aprovecharon de nuevo la crisis, que esta vez sí que parecía la definitiva. Organizó un

camino de mejora -¿mejora?- hacia unos seres que prometían, que colonizaron todos los ambientes y todas las geografías. Seres realmente complejos, entre los que comenzaban a destacar los primates con sus habilidades. La fuerza del destino… ayudada por unos movimientos tectónicos y una climatología cambiante que hizo de los bosques tropicales un paraíso. Por poco tiempo, ya que fracturó a los de África y casi colapsó la continuidad de aquellas maravillas de animales: los primates que hace diez millones de años eran los reyes del mambo fueron diezmados por el caminar lento y seguro de las fuerzas geológicas. De forma que sólo quedaron algunos pocos en los árboles, viviendo, que no compitiendo por la supremacía. Y hete aquí que de estas mismas causas de la catástrofe surgieron las bases para un nuevo empujón, de donde nació el *Homo*, *sapiens* para más señas.

Y a partir de ahora… ¿qué? Pues a partir de ahora, más de lo mismo. El caudaloso río de la Vida, lleno de meandros a derecha e izquierda, continúa lentamente con su fuerza arrolladora e imparable. ¿Cuál será el próximo cambio de rumbo en la "complejidad"? ¡Quién lo sabe!

Aunque hay quienes opinan lo contrario,[2] personalmente creo que un nuevo meandro, un inevitable cambio de rumbo se producirá, un nuevo meteorito, una nueva configuración de los continentes, un nuevo episodio magmático, un cambio cualitativo en la química atmosférica, un mal uso de nuestra inteligencia… inevitablemente algo sucederá que resultará letal para nuestra especie y que será una oportunidad para alguno de nuestros compañeros de viaje, **en todo caso insustancial para la marcha de la Vida**, para la marcha de la Tierra y para el discurrir de la intensa actividad del Universo.

¿Es el final?

Pudieran bien ser éstas las últimas palabras de la "*La Biografía de la Vida*".

Pero con ellas no acaba mi afán escribano. Porque aún nos quedan incógnitas que interesan nuestra curiosidad: *¿Y después, qué*? ¿Qué puede acontecerle a nuestra conocida Vida a lo largo del devenir del tiempo futuro? ¿Hay vida fuera de nuestras fronteras?

Es difícil pensar con toda seguridad que la Vida se acabe con nosotros. Por ello me voy a permitir hacer una sucinta inmersión en estos temas a lo largo de cinco capítulos que efectivamente serán los últimos. Y entonces, sí, podré echar el telón.

NOTAS DEL CAPÍTULO 57:

1. Podéis refrescar el tema releyendo el capítulo 37, "*La gran extinción del Pérmico/Triásico*".
2. Un ejemplo lo podréis encontrar en esta recomendable lectura, "*El apocalipsis improbable*", del blog "*La pizarra de Yuri*".

58. Buscando vida desesperadamente

En el último capítulo dábamos por concluido el largo paseo durante el cual hemos permanecido atentos al devenir de nuestra compañera de viaje: la Vida. El caso es que le he tomado cariño y me cuesta el poner el cartel de fin de etapa. Porque nosotros nos quedamos, pero la Vida continúa. Entonces…

¿AHORA QUÉ?

Hemos conseguido llegar a lo largo de esta historia hasta el siglo XXI. Queda lejano aquel inicio de hace 4.570 millones de años cuando una incipiente estrella y varios planetesimales danzaban el vals que les imponían las leyes del Universo. El ambiente estaba enrarecido, la casualidad había congregado en un punto del espacio y en un momento del tiempo a ingentes nubes de gas y polvo que peleaban entre la atracción gravitatoria y la presión expansiva como consecuencia de la energía surgida en aquella gran compactación. En aquel momento constituyente… ¡¿quién hubiera imaginado el final de la representación?!

Y sin embargo, a pesar de la intensidad de los hechos durante los pocos miles de millones de años transcurridos en el intervalo, no deja de ser eso: un nimio detalle en la inmensidad de las dimensiones espaciales y temporales del Cosmos. Una pincelada con un largo pasado y un profundísimo futuro.

No puedo dejar de pensar que esta nube de gas y polvo de donde surgió *nuestro todo* estaba formada por viejos personajes, unos, como el hidrógeno y el helio –no mucho más- nacidos en los primeros segundos después de… digamos que el Big Bang.[1] Y

otros, generados en los infernales hornos nucleares de las infinitas estrellas que han sido y se fueron antes de nuestro Sol, alucinantes fuegos artificiales de supernovas. A disposición de todos. En cualquier parte del Universo.

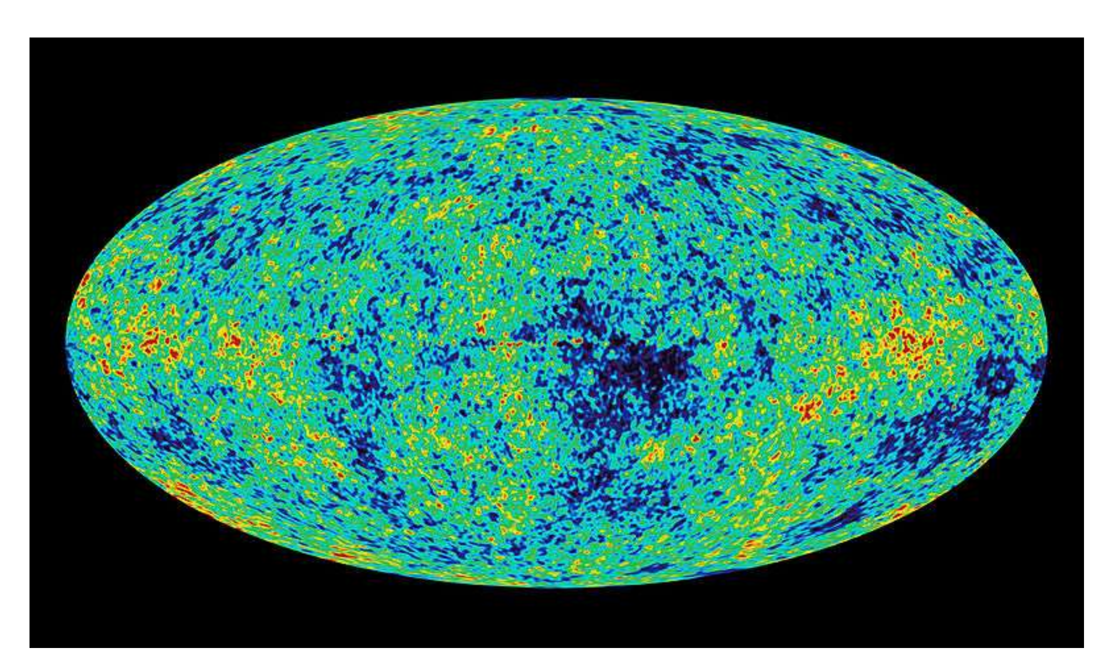


Foto de la casa de la Vida: imagen del universo y de su estructura reflejada en el mapa térmico de la radiación de fondo de microondas, tomado por la sonda WMAP (Wikipedia, credito: NASA, dominio público)

Sí. El Big Bang es nuestra mejor explicación de la casa común que llamamos Cosmos. Momento constituyente en donde hoy por hoy científicamente pensamos que se ancla la frontera más lejana de nuestro conocimiento. ¿Qué fue lo que motivó el Big Bang? Misión imposible el descifrarlo, ya que si imaginamos su inicio como un punto de infinita densidad y energía en un espacio infinitesimal, difícilmente sabremos qué hacer con él. No lo sabemos manejar, no somos capaces de conocer cómo fue el detalle de su instante inicial ni con las más sofisticadas herramientas y especulaciones matemáticas. La teoría cuántica nos abre una posibilidad, ya que ella nos explica la realidad de partículas virtuales, a escalas de lo que se supone es el elemento indivisible más pequeño del tejido espacio-tiempo. Partículas que salen de la

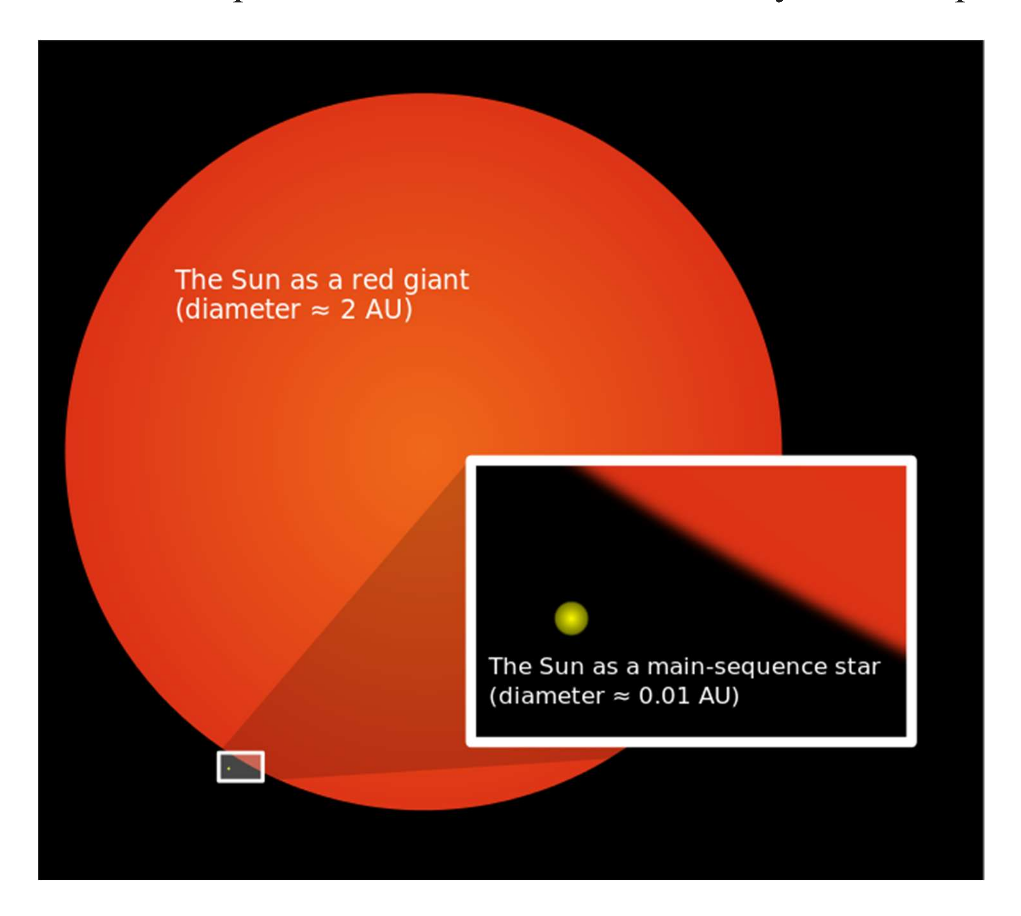
energía del vacío formando parejas materia-antimateria y que desaparecen en tiempos infinitesimales como si nada hubiera ocurrido. No tenemos capacidad para observarlas, pero sí podemos intuir su paso al medir sus consecuencias. Una fluctuación cuántica de este estilo pudo ser la chispa inicial que impulsara una fría y desenfrenada expansión inflacionaria del tejido espacio-temporal cuya colosal energía, al frenarse más tarde, creó un universo de materia y radiación en donde nos encontramos. Un Universo común, homogéneo e inmenso para la escala humana, en donde las leyes físicas son iguales en cualquiera de sus puntos. Un Universo que generaliza en toda su dimensión el mismo nivel de oportunidades experimentadas en la Tierra.

No es éste el lugar para hacer digresiones sobre el tema, así que aquí lo dejamos, en el primer momento de la semilla que montó todo el escenario y sus actores. 13.720 millones de años atrás.

La historia contada en los 57 capítulos anteriores ocupa el último tercio de esta inmensidad. Y aún le queda cuerda al resorte que la mueve.

Pero descendamos de las alturas para recuperar nuestra más próxima parcela. El Sol es una estrella conocida, al igual que su previsible dinámica.[2] Sabemos que irá quemando su combustible, ahora hidrógeno y helio, más tarde carbono, siguiendo una cadena de etapas cada vez más rápidas y violentas. Durante este proceso a partir de hoy, la Tierra seguirá con su progresivo alejamiento de su estrella a medida que el Sol vaya quemando su masa. La temperatura del horno se irá haciendo cada vez más elevada, lo que "inflará" las capas gaseosas más externas de la estrella. Se cree que la vida unicelular terrestre, semejante a la actual microbiana, aún podrá sobrevivir en latitudes y cotas altas hasta dentro de 2.800 millones de años, mil millones después de que las condiciones de temperatura en el resto de los lugares los hagan inhabitables. Los últimos rastros de vida que sobrevivan sobre la Tierra serán microbios extremófilos

en ambientes cálidos y de alta salinidad, posiblemente en cuevas subterráneas. Después de esos momentos la Vida ya no será posible.



Comparación del tamaño del sol entre el momento actual y cuando sea una gigante roja, de aquí a unos 5.000 millones de años, con un tamaño de 2 AU. En la figura, AU significa "Unidad Astronómica", que es la distancia a la que hoy en día se encuentra la Tierra del Sol. Por ejemplo, Marte está a 1,52 AU; Ceres, en el cinturón de asteroides, a unos 2,8 AU (Wikimedia, GFDL)

De aquí a 4.000 millones de años la Tierra habrá migrado hasta donde ahora orbita Marte, unas 1,6 veces más alejada de lo que se encuentra ahora del Sol. Pero no tendrá escapatoria: el volumen estelar de la estrella, progresivamente creciente, casi le habrá dado alcance. Y sí, será definitivamente el fin de la Vida tal como la conocemos sobre la Tierra. Mil millones de años después el Sol dará su último estertor, transformándose en una estrella gigante roja para

ir progresivamente enfriándose y entonces, una vez que no haya fuego interno que empuje hacia fuera, la gravedad ganará definitivamente la partida menguando su tamaño hasta convertirse en una enana blanca. Sus átomos se apelmazarán tanto que no habrá espacio vacío entre los electrones, que al estar tan juntos comenzarán a darse codazos electromagnéticos usando la repulsión de sus cargas negativas. La fuerza de esta lucha contendrá la compresión gravitatoria: nuestra estrella se quedará con un tamaño semejante al de la Tierra. **FIN**.

Pero no, no es el fin. Ni su nacimiento fue el principio, ni su periodo de vida la única existencia. Es difícil y fácil de imaginar: sabemos que si se repite un entorno semejante, es decir, un proceso de Big Bang idéntico en el que se dibujen las mismas asimetrías que han producido el mismo tipo de fuerzas y de materia que conocemos, y lo situamos cerca de una fuente de calor que energice las combinaciones químicas, en el sitio preciso para que el agua se mantenga líquida… es probable que se repita el proceso y que surja la Vida. ¿Basada en el carbono? Lo más plausible. Los mismos experimentos metabólicos con toda seguridad. ¿Las mismas formas? Seguramente no. ¿Al final la vida inteligente? Quizás sí o quizás no, ya que, como ya sabemos por el capítulo 55 anterior, nuestra capacidad de razonamiento reflexivo es fruto de unas ¿irrepetibles? circunstancias geológicas y climáticas. Ésta es la parte difícil de imaginar. Lo fácil surge al ver que nosotros estamos aquí y sin lugar a dudas constatamos que esta historia, independiente de cuán probable sea, es al fin y a la postre cierta.

En otro mundo semejante las circunstancias serían distintas, a pesar del determinismo de las leyes físicas y a pesar del indeterminismo calculado de nuestra más profunda esencia cuántica. Quizás las cianobacterias no sembrarían el mundo de oxígeno o quizás no habría un nuevo Chilxuluc que hiciera desaparecer a los dinosaurios. Pero la esencia de la Vida sí estaría presente.

Esto pudo pasar antes del nacimiento del sistema solar y puede pasar cuando no existan ni nuestras cenizas. Y lo que es más sorprendente: al mismo tiempo que nuestro proceso constitutivo solar estaba en marcha, otros similares pueden estar escribiéndose ahora mismo… ¿por qué no? Somos insoportablemente antropocéntricos, vicio que nos impide ver con nuestros ojos. Nuestro entorno es vastísimo, común y lleno de oportunidades. Y la Vida, como resultado de un proceso de complejidad en los conocidos y pronosticables sistemas químicos, se empecina. Y medra donde menos nos lo podemos imaginar. Estoy hablando de organismos extremófilos, vecinos nuestros, en nuestro planeta.

Son una evidencia. Pero también podría hablar de cosas conceptual y físicamente imaginables, como la biología basada en el silicio en vez del carbono, o en otros planetas o en otras lunas de nuestro sistema. O quizás en otros sistemas solares de nuestra Vía Láctea o de lejanas galaxias. Sólo se tienen que dar las condiciones, ciertamente complejas, y el interruptor se accionará.

En nuestro Universo, al menos en la zona que se puede observar desde la azotea de casa con toda la sofisticada tecnología disponible, se cree que hay entre 50.000 y 125.000 millones de galaxias, cada una de ellas con cientos de miles de millones de estrellas. Unas estimaciones realizadas en 2003 por el astrónomo australiano Simon P. Driver cifran el número de estrellas observables desde la Tierra en 7 x 10^{22}.[3]

Los resultados se han obtenido a partir de la medición de la luminosidad de las galaxias en un sector del espacio mediante los más sensibles telescopios disponibles en su momento, para luego extrapolar el resultado al total del volumen del Universo observable. El número tiene que ser superior, y lo sabremos a medida que la tecnología nos amplíe la profundidad de la visión. De hecho, en 2010 se ha publicado un estudio sobre las enanas rojas en el Universo que triplica las estimaciones anteriores.[4]

Sean el número que sean, lo significativo es que, como veremos de aquí a dos capítulos, muchas de estas estrellas cuentan con unos cuantos planetas, algunos rocosos, y cada planeta con algunas o muchas lunas. El campo está servido y es extenso. Y más allá de nuestro horizonte de visión, a unos 45 mil millones de años luz, hay más… un infinito más.

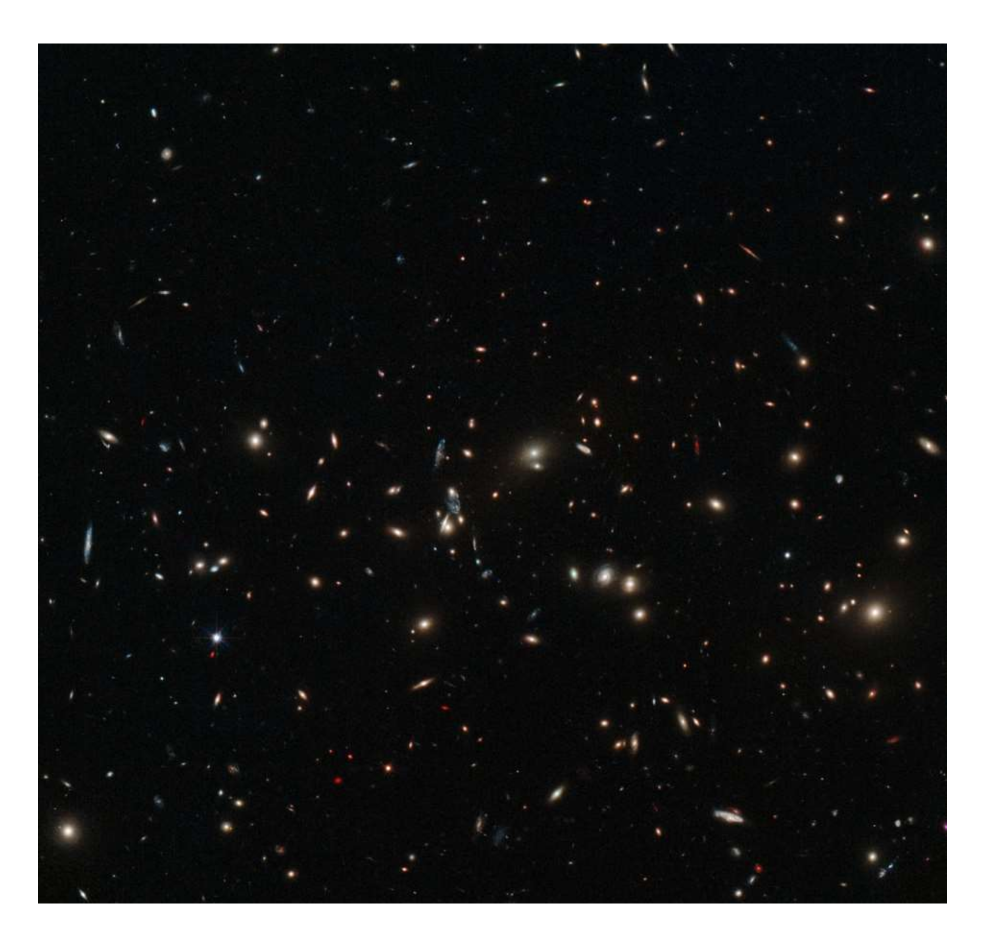


Imagen del universo profundo tomada por el telescopio Hubble. Corresponde al cúmulo de galaxias MACS J0152.5-2852 (Wikipedia, créditos: ESA/NASA, CC BY-SA 3.0 Unported)

Vamos a intentar profundizar.

Se han hecho esfuerzos para cuantificar las probabilidades de existencia de vida en otros lugares del Cosmos. Y la verdad es que creo que no hay que hacer mucho caso de los detalles… con la música es suficiente, y la música dice que puede que no suene descabellado. Aunque como a todo lo que, dados los conocimientos

y posibilidades actuales de la ciencia, no podemos aplicarle un completo proceso de falsabilidad… podemos al menos someterlo a cuarentena.

Simplemente por aportar cifras, comento la famosa ecuación de Drake, concebida por el radioastrónomo Frank Drake en 1961, con el objeto de cuantificar el número (**N**) de sociedades inteligentes extraterrestres de la Vía Láctea que están al alcance de nosotros. Lo hace a través de la siguiente fórmula, que parece alambicada pero que no deja de ser la "cuenta de la vieja" mediante un proceso de acumulación de posibilidades:

$$\mathbf{N = R^{*} \,.\, F_p \,.\, n_e \,.\, F_l \,.\, F_i \,.\, F_c \,.\, L}$$

Aclaro el significado de cada factor: **R*** es el número de estrellas formadas cada año en nuestra Vía Láctea. De ellas habrá una fracción $\mathbf{F_p}$ que contengan planetas, de los cuales serán rocosos, como la Tierra con su Vida, en un porcentaje $\mathbf{n_e}$. En la nómina de estos planetas rocosos una fracción $\mathbf{F_l}$ desarrollan sistemas químicos autosuficientes que llamamos Vida. De ellos, con una proporción $\mathbf{F_i}$ emergen seres inteligentes, los cuales en una fracción $\mathbf{F_c}$ tendrán, en algún momento de su civilización, tecnología y voluntad para comunicar su existencia más allá de sus fronteras planetarias durante los **L** años que dure tal civilización y tal voluntad.

Tras establecer su fórmula, Drake concluyó que habría hasta **diez** civilizaciones **en nuestra galaxia** que podrían contactar entre ellas. Hoy por hoy estamos en condiciones de incorporar a la nómina de estas civilizaciones, al menos, la nuestra. Quedamos a la espera de las 9 restantes.

Nos sentimos francamente optimistas si nos quedamos con el conjunto de los cuatro primeros factores, que son los que definen el *número de planetas en los que se habría desarrollado la vida*, casualmente llega al mismo número del final: diez. Pero la excitación no dura mucho ya que los siguientes dos factores de los siete -aquellos que cuantifican el *porcentaje de casos de vida*

inteligente, con tecnología adecuada para comunicarse y que quieran hacerlo- introducen una gran restricción y dejan el cómputo global en una escasa milésima. Vuelve a subirnos la adrenalina al observar como al final de la propuesta “drakeniana” viene a salvarnos la **L**, que es *el tiempo en que estas civilizaciones están comunicativamente activas*: diez mil años. Y todo arreglado para Drake, un tipo muy serio pero también muy especulativo. Con toda la picardía posible, se me ocurre que también podemos especular con los poco más de cien años de nuestra “radio-civilización”, lo cual dejaría las anteriores cuentas de la Vía Láctea relativamente menguadas.

Ya sé que esta última frase es un golpe bajo para nuestras expectativas… aunque no tanto. Ya que las predicciones no se acaban con un especulativo factor **L**, el parámetro que hipotéticamente arregla la foto de familia de la Vía Láctea. Démonos cuenta de que ésta es una galaxia muy antigua, de tamaño intermedio y de unos 100.000 años luz de diámetro. Comparando su tamaño con los 5,5 millones de la supergalaxia IC1101 se queda en una minucia, pero resulta un monstruo para la pequeña 1 Zwicky 18 de tan sólo 5.000 años luz. Nuestra galaxia familiar casi podría clasificarse como una galaxia de tipo estándar, con sus 10 civilizaciones extrapolables como promedio al conjunto de nuestro universo. Intentemos hacer ahora un ejercicio mental a través del cual nos vamos a convertir en el más conservador de los astrónomos, ya que apostaremos por el más restrictivo valor que se nos ocurra para **L** = 1, a fin de cuentas estamos nosotros.

Y te animo ahora a aplicarlo al Universo total -al menos al observable con aproximadamente 10^{11} galaxias- añadiendo este nuevo factor a la primitiva ecuación de Drake: **el salto cuantitativo en el valor ampliado de N es brutal**. De nuevo os confieso que me doy cuenta del grado de especulación que incorpora el triple salto mortal intelectual que estamos haciendo, el cual, evidentemente, puede ser inmenso. Pero también creo que la licencia no resulta definitivamente invalidante de la hipótesis de posibilidad de vida

inteligente exterior. Es más, la dirección que marca parece bastante probable aunque hoy por hoy, a pesar de los serios esfuerzos aplicados, principalmente a través del proyecto SETI,[5] aún no hemos logrado comunicar con nadie. Y quizás nunca lo consigamos.

Esto fue en 1961.

En 2002 los investigadores australianos Charles H. Lineweaver de la Universidad del Sur de Nueva Wales y Tamara M. Davis del Centro Australiano de Astrobiología han intentado cuantificar[6] en la medida de lo posible cuál puede ser la probabilidad de aparición de vida en un planeta semejante a la Tierra. Algo equivalente al factor $\mathbf{F_l}$ de la ecuación de Drake. Se trata de un estudio matemático basado en la idea de qué pensaría un jugador de lotería que se sabe miembro de un grupo amplio de jugadores, a los que no conoce, pensando simplemente en cómo le ha ido a él. En si le ha sido fácil ganar un premio o no. Lo que le permitiría hacerse una idea de cuán probable es el ganar. El estudio de Lineweaver llega a la conclusión de que para un planeta semejante a la Tierra con una edad superior a los mil millones de años, la probabilidad de que en él se produzca un proceso de biogénesis es del 13% con un grado de confianza del 95%. No deja de ser un estudio teórico más, cuyo resultado no implica necesariamente que la Vida sea un elemento común en el universo. Pero también es un dato más en la misma dirección.

Y sin embargo… ¿dónde está? Quizás no existan seres tecnológicos por ahí afuera, lo que sería una pena, que no una decepción. Porque estamos discurriendo sobre la existencia de vida, cualquiera que sea su forma, incluso no necesariamente inteligente. Recordemos que 10 son el número de planetas que según Drake habrían desarrollado la vida en la vía Láctea. Que sepamos la hay en uno, nuestra Tierra. Un 1 seguido por once ceros si lo extendemos a todo el Universo observable. Y en esto estamos. Buscando.

En el siguiente capítulo ampliaremos el conocimiento sobre la vida real en condiciones extremas. Porque realmente ahí afuera hay una

inmensidad que podríamos pensar imposible para la vida, aunque quizás no tanto.

NOTAS DEL CAPÍTULO 58:

1. La teoría del ***Big Bang*** es el modelo cosmológico predominante para los períodos conocidos más antiguos del universo y su posterior evolución a gran escala. Afirma que el universo estaba en un estado de muy alta densidad y luego se expandió.
2. Os animo a leer la interesante serie "*La vida privada de las estrellas*" del blog El Tamiz.
3. Tenéis un poco más detalle en la web de BBC News al artículo "*Astronomers count the stars*" (julio de 2003).
4. Podéis ampliar la información leyendo esta reseña de diciembre de 2010 en la web SINC, Servicio de Información y Noticias Científicas, "*Triplican el número de estrellas del universo*".
5. **SETI** es el acrónimo del inglés ***S****earch for* ***E****xtra****T****errestrial* ***I****ntelligence*, o "Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre". Existen numerosos proyectos SETI que tratan de encontrar vida extraterrestre inteligente, ya sea por medio del análisis de señales electromagnéticas capturadas en distintos radiotelescopios, o bien enviando mensajes de distintas naturalezas al espacio con la esperanza de que alguno de ellos sea contestado.
6. En este artículo de la revista Astrobiology de 2002. "*Does the Rapid Appearance of Life on Earth Suggest that Life Is Common in the Universe?*", Charles H. Lineweaver y Tamara M. Davis.

59. Extremófilos

A lo largo de este nuevo capítulo avanzaremos un poco más en el proceso de investigación sobre la existencia de Vida fuera de nuestras fronteras planetarias. En el capítulo anterior hacíamos una serie de disquisiciones sobre la probabilidad de su ocurrencia partiendo de la conocida fórmula de Drake. En éste analizaremos lo que pueden ser objetos de nuestra búsqueda apoyándonos en lo que conocemos: los seres extremófilos, esos seres casi invisibles que gustan de vivir en los sitios más insospechados.[1]

Hoy, medio siglo más tarde de que Drake fijara su ecuación, la humanidad está embarcada en algo más profundo y estructurado. Quizás la tecnología más desarrollada haya ayudado al cambio de rumbo. Parece que abandonamos la idea de un contacto con seres pensantes y tecnológicos fuera de nuestra esfera, aunque ahí queda el proyecto SETI, y pasamos a hacer énfasis en las bases más elementales de la búsqueda, como si quisiéramos ir pasito a pasito a través de los primeros parámetros de la ecuación de Drake. Hoy en día el esfuerzo se centra en **buscar lugares adecuados** para la Vida, **aunque no sea inteligente**. Y el campo de juego es más que inmenso.

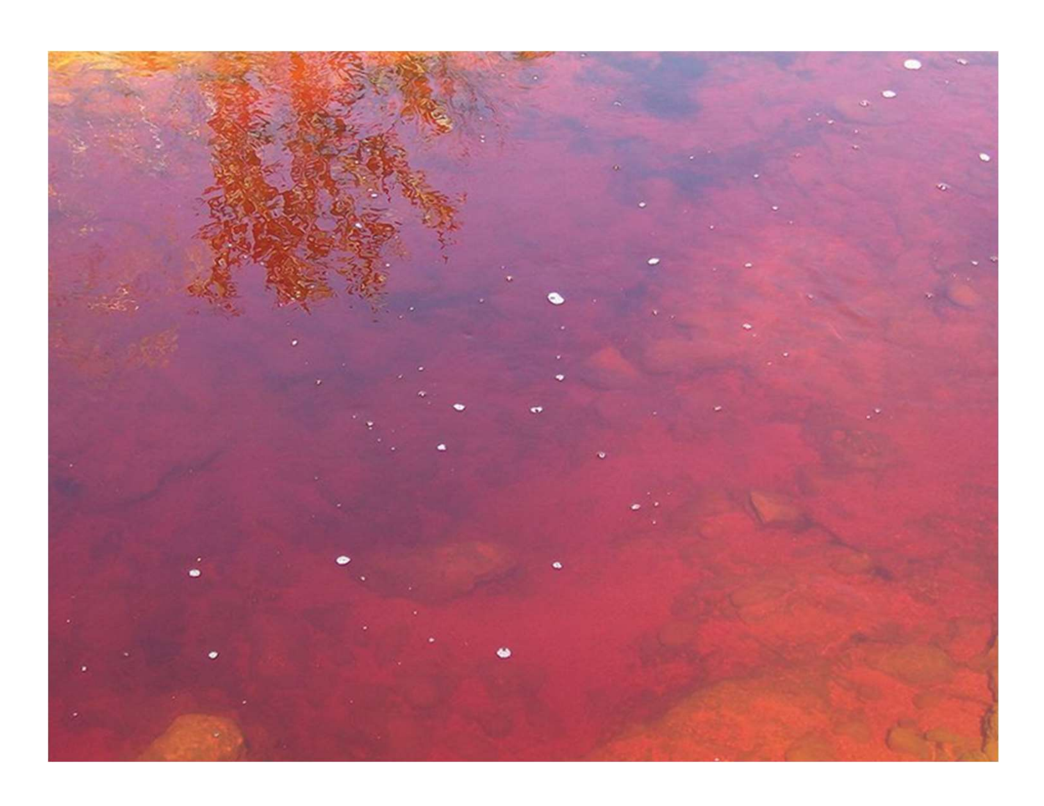
Creo que en este campo debemos discernir dos inmensas áreas de búsqueda: *la primera*, conocer al máximo la admirable versatilidad de la Vida que nos sorprende cada día con un nuevo organismo que vive en un entorno cada vez más imposible: el mundo de los **extremófilos**. *Lo segundo* es saber dónde pueden encontrase estos lugares más allá de nuestro planeta. Inicialmente, dentro del Sistema Solar. Y como sabemos que sólo durará unos cinco mil millones de años, ampliar el campo de posibilidades más allá de nuestra familia,

en el Universo que podemos observar, una gran esfera de ¡¡¡46 mil millones de años luz de radio!!! que se extiende hacia todos los puntos cardinales. Sobrepasada esta frontera incluso hay mucho más, lamentablemente algo que nunca alcanzaremos a ver en su totalidad desde la Tierra. La velocidad de la luz manda.



Extremófilos del tipo termófilo producen algunos de los vistosos colores de la fuente termal Grand Prismatic Spring, en el Yellowstone National Park (Wikimedia, dominio público)

Es sorprendente dónde podemos encontrar bacterias. Ya sabemos que pudieron surgir, y aún las vemos allí hoy en día, en los mundos de altas temperaturas, a gran presión y con extraños pH de los venteos hidrotermales submarinos. Un extremófilo es un microorganismo que vive en condiciones extremas, entendiéndose por tales las que son muy diferentes a aquellas en donde viven la mayoría de las formas de vida en la Tierra. Suelen ser microorganismos tipo bacteria, aunque también hay eucariotas pluricelulares. Su pequeño tamaño y el hecho de que su metabolismo sea muy adaptable -sus enzimas funcionan de manera distinta a las del resto de organismos- ha permitido que colonicen ambientes que son mortales para la mayoría de los seres complejos.

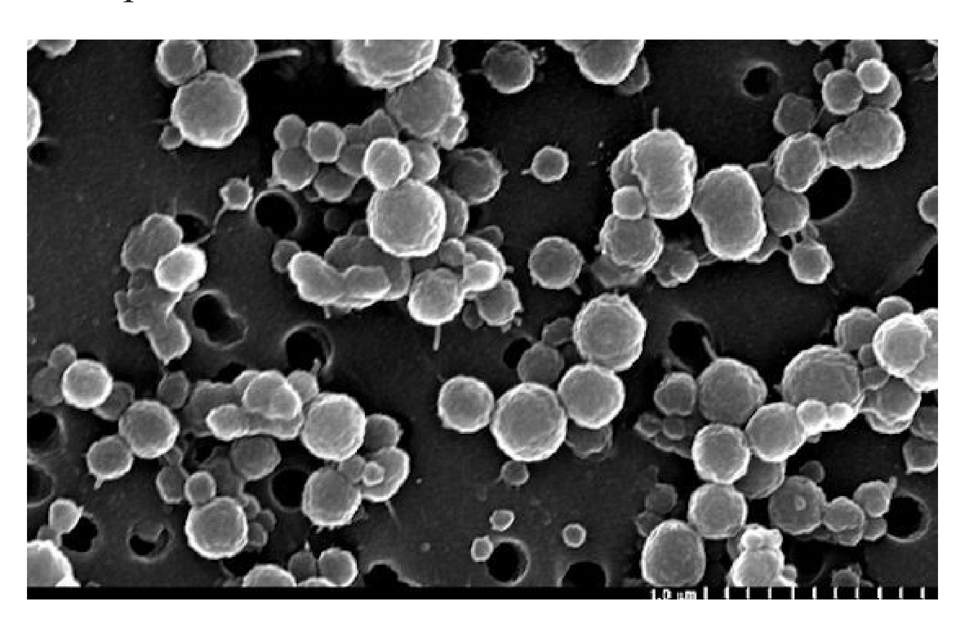


Las rojizas aguas del Río Tinto, color que deja el hierro de la pirita oxidado por las bacterias quimiolitótrofas. El ácido sulfúrico, segundo residuo de tan peculiar metabolismo, no se ve aunque casi podemos intuir el bajo pH (Wikimedia, dominio público)

Las hay que viven en ambientes sin agua, otras necesitan un medio extremadamente ácido o extremadamente alcalino para medrar. Ya hemos hablado de las que viven bajo las enormes presiones de los fondos marinos, llegando a once mil metros de profundidad. ¡¡Más de mil veces la presión a nivel del mar!! Recordemos que nos aterrorizan las 90 atmósferas sobre la superficie de Venus. Las hay que precisan para vivir de una concentración salina que resultaría letal para el resto de vida. Y la sorpresa no deja de ser absoluta cuando hemos conocido que hay vida a tres kilómetros bajo la superficie terrestre, embebida en las microfisuras de las rocas, donde soporta temperaturas de sesenta grados centígrados y un pH básico de casi 10 (el normal para nosotros es 7, el del agua, y el máximo, 14). Dominan todo el espectro de temperaturas, desde los amantes del agua fría por debajo de los 5ºC, creando sus propios

anticongelantes, hasta las que son felices a más de 100ºC y altas presiones. Aquellas para las que venenosos iones metálicos son como caramelos. Y qué decir de la tan temida radiación ionizante: en el área afectada por el accidente de Chernóbil muchos animales y plantas han mostrado, a pesar de los altos niveles de radiación en la zona, una supervivencia y adaptación inesperada en muchos casos.

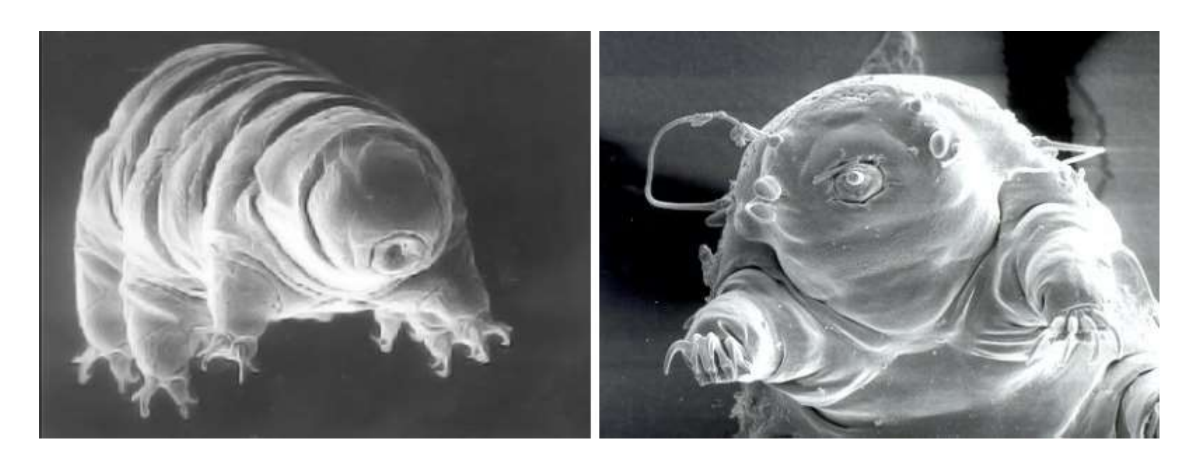
Es conocido el caso de los organismos acidófilos que pueblan las aguas del río Tinto, en España. Son extraños individuos de diversas familias de bacterias quimiolitótrofas y eucariotas, como algas y hongos, que sólo habitan en estas aguas del Tinto: extraen su alimento y energía de la pirita (FeS_2) y practicando la fotosíntesis en un mundo de un pH extremadamente ácido, entre 1,7 y 2,5. Algo parecido a vivir entre los ácidos gástricos de nuestro estómago. O en el planeta Marte. Tanto es así que diversos estudios realizados han confirmado la posibilidad de que algunos de estos organismos del río Tinto puedan sobrevivir bajo las restrictivas condiciones del mencionado planeta.[2]



Bacterias del lago Vida, en la Antártida (NASA, dominio público)

En el Valle Victoria, situado al Este de la Antártida, se encuentra el lago Vida. Su superficie está permanente congelada y mantiene una capa de hielo de más de veinte metros que impide el paso de la

luz solar. Totalmente oscuro, sus aguas poseen una salinidad seis veces mayor que la del mar y se encuentran a una temperatura media de -13,5 ºC. Esta alta salinidad hace que parte de sus aguas permanezcan en estado líquido, pero, al constituir un entorno cerrado al mundo exterior, no contienen oxígeno. Aunque sí pueden presumir de tener el récord de los mayores niveles de óxido nitroso de cualquier agua natural en la Tierra, resultado de las reacciones químicas entre la salmuera y los sedimentos ricos en hierro que hay bajo el agua helada. Este compuesto químico, el óxido nitroso, provoca alucinaciones en los hombres, generando un estado eufórico y en algunos casos ocasionando la pérdida de parte de la memoria. Diríamos cualquier cosa del lago Vida menos que es un sitio apetecible para la Vida. Antagónico juego de palabras que, por contra, se ha demostrado falso, ya que en este ambiente viven "felices" diversas y abundantes comunidades bacterianas, sin la asistencia de los energéticos fotones de la luz solar y allí "encarceladas" desde hace más de tres mil años. Poco menos que sorprendente, pero real.



Imágenes de Tardígrado (obtenidas del blog marulo.com, CC BY-NC 3.0)

Otro curioso caso, el de los tardígrados -"*los de lento caminar*"-. Me parecen un ejemplo asombroso de la versatilidad de la Vida. Ya no hablamos de bacterias que, a lo mejor por el desconocimiento que tenemos de ellas, parece como si su pequeñez fuera la tarjeta mágica para cambiar con facilidad su metabolismo y poder pasearse por los

mil escenarios diversos en donde les toca vivir. Un tardígrado es un organismo del dominio eucariota pluricelular y además de aspecto muy amable. Son muy pequeños, alrededor de un milímetro de longitud, con ocho patas y un moverse parecido al de los osos, por lo que también se les llama "*ositos de agua*", y aunque a la vista de su imagen nadie lo diría, están emparentados con los artrópodos.

La habilidad más impresionante de los tardígrados es su capacidad de entrar en una especie de estado de hibernación cuando las cartas le vienen mal dadas. Inducen su deshidratación, de forma que pasan de tener un 85% de agua corporal, como es habitual en este animal, a quedarse con tan sólo un 3%. En este estado el crecimiento, la reproducción y el metabolismo se reducen o cesan temporalmente, y así pueden pasar más de 10 años en un estado de anhidrobiosis.[3] No es de extrañar por tanto que sobrevivan a complicadas situaciones de frío o calor -pueden aguantar temperaturas que oscilan entre menos 272ºC, casi el cero absoluto, y más 149ºC-. A principios de 2016 científicos del Instituto de Investigación Polar de Japón han confirmado que han "revivido", tras 30 años congelado, un tardígrado encontrado en unas muestras de musgo del Polo Sur.[4] La sequedad extrema, la radiación ionizante y la polución no son problema para ellos. Un baño en alcohol puro o éter puede serles tan poco peligroso como caminar bajo el agua. Científicos rusos afirman haber encontrado tardígrados vivos en la cubierta de los cohetes recién llegados de vuelta del espacio exterior. En fin, unos campeones de lo inimaginable. Quizás parte de su éxito radique en que practican la transferencia horizontal de genes con otras especies ¡hasta una sexta parte de su ADN lo han conseguido así![5]

Estas habilidades extremófilas también las poseen seres más complejos, como por ejemplo el crustáceo branquiópodo *Artemia salina*. Vive en charcas de aguas saladas, como podéis imaginar soportando una alta concentración de sales en su exterior y episodios de escasez de agua. Cuando se llega a la desecación total la *Artemia* desova unos huevos, quistes, altamente resistentes. En estas extremas circunstancias los quistes pueden sobrevivir durante una

hora a temperaturas superiores a los 100 °C y en el otro extremo de la horquilla pueden ser expuestos casi al cero absoluto de forma indefinida. Son capaces de resistir estando en el interior de cristales de sal común. Y, como los tardígrados, soportan las altas radiaciones, la inmersión en líquidos mefistofélicos como el alcohol y la acetona y la total ausencia de oxígeno.

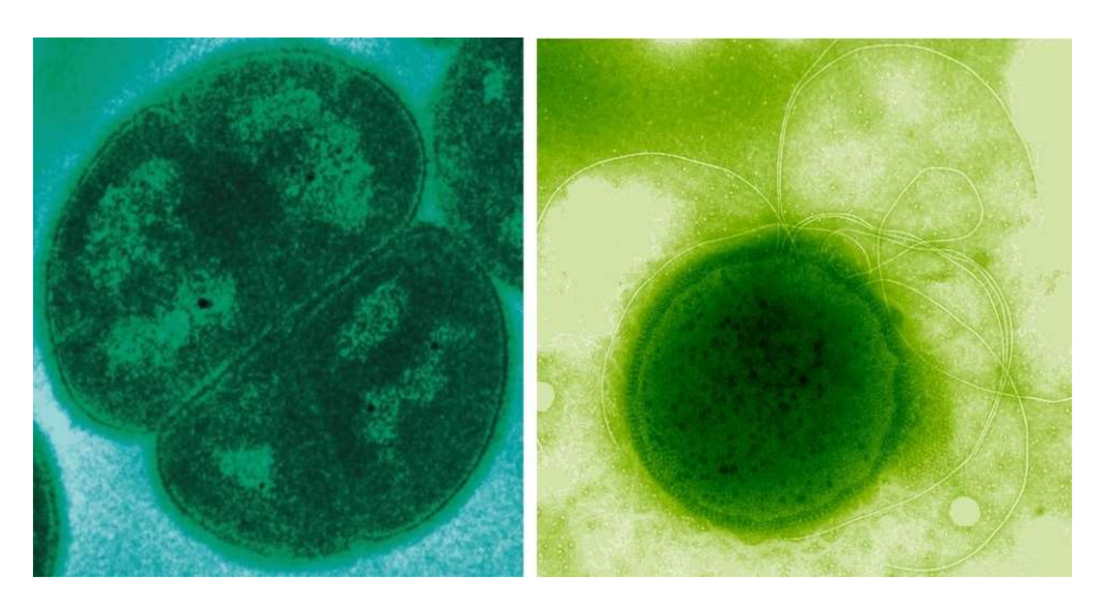


Imagen de Artemia salina (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Como no podíamos esperar otra cosa, el huevo de la *Artemia* tiene una capacidad asombrosa de resurrección. Una vez se encuentra de nuevo en un ambiente húmedo, en un periodo de 24 a 48 horas el quiste vuelve a hidratarse y continuar su existencia como larva viva.

Terminamos esta breve relación de extremófilos hablando de la bacteria *Deinococcus radiodurans*. Supongo que imaginaréis tras la lectura de su nombre en qué es campeona. Sí, soporta bien, pero que muy bien, la radiación. Como le sucede también a la archaea *Thermococcus gammatolerans,* ¡buen nombre también! Entre otras habilidades extremófilas (desecación, temperaturas extremas, vacío…) diversos estudios,[6] llevan a la conclusión de que pueden recibir dosis de radiaciones ionizantes cuatro órdenes de magnitud

superiores a las que son letales para los humanos. Estaríamos hablando de unos 15.000 a 30.000 grays. El gray es la unidad de la dosis de radiación ionizante absorbida y podemos considerar, más o menos, que recibir 10 es mortal de necesidad para un humano.



A la izquierda la bacteria Deinococcus radiodurans y a la derecha la archaea Thermococcus gammatolerans (Wikimedia, dominio público y CC BY-SA 3.0 Unported)

Y qué decir de ciertos organismos endolíticos que viven en suelos profundos, ocupando microporos entre los granos minerales de las rocas soportando altas presiones y temperaturas. Es el caso de la bacteria anaeróbica *Bacillus infernus* -¡otra vez un buen nombre!- encontrada a casi 3.000 metros de profundidad o de la también bacteria *Desulforudis audaxviator*, la "*audaz viajera*" de los 2.800 metros bajo el nivel del suelo.

Como podéis imaginar podríamos traer a nuestro relato infinidad de casos de este tipo de organismos extremófilos que nos parecen increíbles. Continuamente se descubren nuevos y en entornos más extremos. Y precisamente estos ejemplos son los que nos llevan a pensar que la Vida es posible en muchos más lugares que los que un hombre puede concebir como habitables. Y estos lugares no tienen por qué estar en la Tierra.



Criptoendolitos embebidos en una roca del continente Antártico. Lo más sorprendente es que se trata de líquenes necesitados de la luz (Wikimedia, GFDL 1.2)

En el siguiente capítulo analizaremos cómo nos las estamos ingeniando para encontrar este tipo de vida más allá de nuestras fronteras planetarias. Hay que reconocer que estamos muy en mantillas e iniciando la ruta, aunque en los últimos pocos años los avances en la definición de posibles escenarios han sido muy importantes. No digo que completamente esperanzadores, pero al menos estamos haciendo camino.

NOTAS DEL CAPÍTULO 59:

1. Un **extremófilo** (de *extremo* y la palabra griega φιλία, *filia* -afecto, amor- es decir "amante de -condiciones- extremas") es un organismo (frecuentemente, un microorganismo) que vive en condiciones extremas, entendiéndose por tales aquellas que son muy diferentes en las que viven la mayoría de las formas de vida en la Tierra.
2. Con relación a la información de la acidez de las aguas del Río Tinto podéis leer esta publicación, "*Geological record of an*

acidic environment driven by iron hydrochemistry: The Tinto River system", David C. Fernández-Remolar et al., de la revista Journal of Geophysical Research de julio de 2003.

3. Para saber más sobre las curiosas habilidades de los Tardigrados podéis leer esta publicación: "*Facts and fiction about long-term survival in tardigrades*", K. I. Jönsson y Roberto Bertolani, septiembre de 2001.

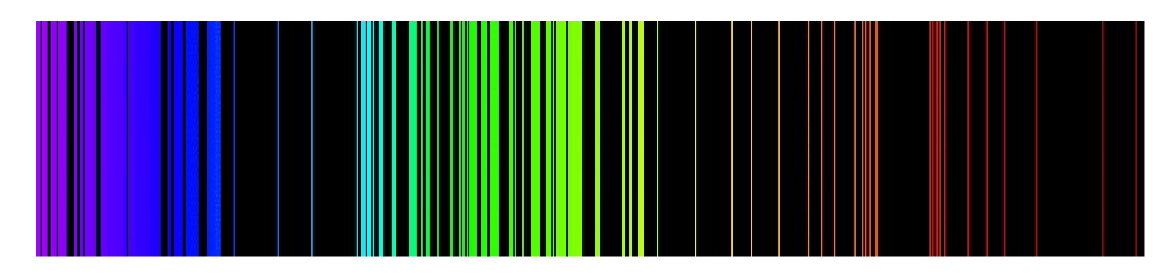
4. "*Recovery and reproduction of an Antarctic tardigrade retrieved from a moss sample frozen for over 30 years*", M. Tsujimoto et al., febrero 2016.

5. En este artículo encontraréis la reseña de tal genoma. "*Evidence for extensive horizontal gene transfer from the draft genome of a tardigrade*", Thomas C. Boothby et al., diciembre 2015.

6. Como este, "*Radioresistance of Deinococcus radiodurans: Functions Necessary To Survive Ionizing Radiation Are Also Necessary To Survive Prolonged Desiccation*", Valerie Mattimore y John R. Battista, febrero 1996; este, "*Comparative survival analysis of Deinococcus radiodurans and the haloarchaea Natrialba magadii and Haloferax volcanii, exposed to vacuum ultraviolet irradiation*", Ximena C. Abrevaya et al., diciembre 2011; o este, "*Thermococcus gammatolerans sp. nov., a hyperthermophilic archaeon from a deep-sea hydrothermal vent that resists ionizing radiation*", Edmond Jolivet et al., mayo 2003.

60. ¿Tenemos vecinos?

En el capítulo anterior habíamos iniciado la búsqueda de vida fuera de nuestro planeta intentando conocer cómo podía ser el objeto de nuestros deseos. Fuera de la Tierra las condiciones, en su mayoría, pueden ser muy inhóspitas, por lo que dirigimos nuestros ojos hacia aquellos seres que conviven con nosotros en ambientes muy, pero que muy, difíciles: los extremófilos. Con esto no quiero decir que realmente vayamos a encontrar el tipo de seres duros de la Tierra. Lo más probable es encontar seres parecidos. Aquí vamos a dedicarnos a ver el campo de búsqueda, lugares en el sistema solar en donde puede ser posible la vida.



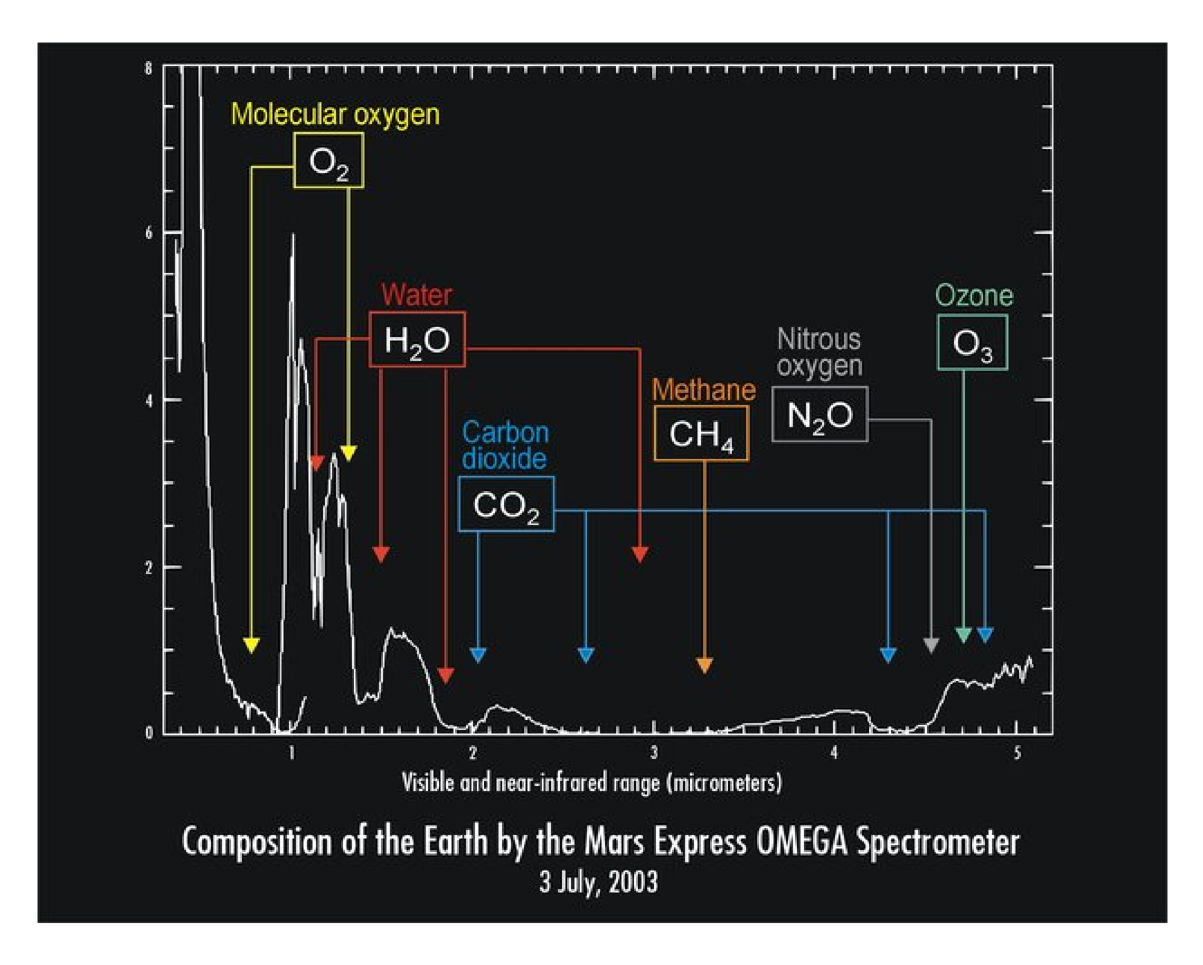
Espectro de frecuencias de un rayo de luz. En este caso se trata de la emitida por átomos de hierro en el intervalo visible electromagnético (Wikimedia, dominio público)

Está claro que no disponemos de una tecnología desarrollada como para poder llevar a cabo una observación directa de estos hipotéticos extremófilos. Por lo que nos deberemos concentrar en la búsqueda de las pistas colaterales que nos llegan con la luz que recibimos del exterior. En su espectro viene la información necesaria. Analizando la distribución de sus bandas podemos saber qué tipo de átomos las

emitieron o se interpusieron en su camino. La explicación es muy sencilla. Cada átomo -elemento químico- tiene una configuración particular de sus capas electrónicas. Cada una a un nivel de energía determinada y específica del elemento. Si uno de sus electrones se muda de una a otra es porque ha recibido o ha emitido un fotón, cuya energía -frecuencia- captamos y podemos ver reflejada en su espectro.

¿Por qué es importante saber que átomos hay ahí? Porque la actividad biológica deja pistas químicas en sus subproductos, lo que se conoce como **biomarcadores**, moléculas resultantes de la actividad metabólica de los organismos vivos. Si queremos saber si en un exoplaneta o en una exoluna hay algo semejante a lo que hay en la Tierra, lo lógico es intentar seguir la pista a estos biomarcadores. Puede haber de muchos tipos en la atmósfera de un planeta habitable, pero la mayoría resultan invisibles si los observamos a varios años luz de distancia. Por este motivo nos tenemos que centrar sobre aquellos elementos que son realmente los mejores indicios de vida: **oxígeno**, **ozono** y **metano**. Además, podemos buscar la presencia de **dióxido de carbono** como producto secundario de la respiración y de **agua** como disolvente universal necesario para que la vida sea una realidad. Aunque no son biomarcadores, ambos juegan un papel fundamental en la biosfera terrestre.

Ya sabemos que el *oxígeno* en la Tierra ha sido en su mayoría consecuencia de la actividad biológica de las cianobacterias y de los seguidores de su invento, la fotosíntesis. Sin embargo, eso fue en la Tierra ¿Pudiera ser que en otros lugares la Vida no hubiera seguido exactamente el camino que tomó en nuestro planeta? Bien podría existir un planeta repleto de organismos que no utilizan el oxígeno en su metabolismo, como pasó en los inicios de nuestro planeta, cuando todo proceso biológico era anaeróbico. Lo cual nos llevaría a una atmósfera en la que este gas no estuviera significativamente presente aunque hubiera vida.



Biomarcadores en el espectro de la atmósfera de la Tierra visto por la Mars Express (Imagen: ESA, fair use)

Pero también tenemos que pensar que aunque haya una fuerte correlación entre la existencia de oxígeno y la de la vida, también se puede producir por procesos abióticos: el oxígeno no sólo es un subproducto del metabolismo orgánico, sino que también lo es de la fotodisociación de la molécula de agua por acción de los rayos ultravioletas, tanto en la atmósfera como en las superficies de masas de agua o hielo. Así que bien pudiera ser que el oxígeno que detectemos en un exoplaneta no tenga nada que ver con organismos vivos. Como vemos, lo relacionado con este elemento puede ser un tremendo lío.

El *ozono* es más fácil de detectar que el oxígeno y en su mayoría proviene de la asociación de tres átomos de oxígeno por acción de las radiaciones ultravioleta: señala la existencia de oxígeno y además

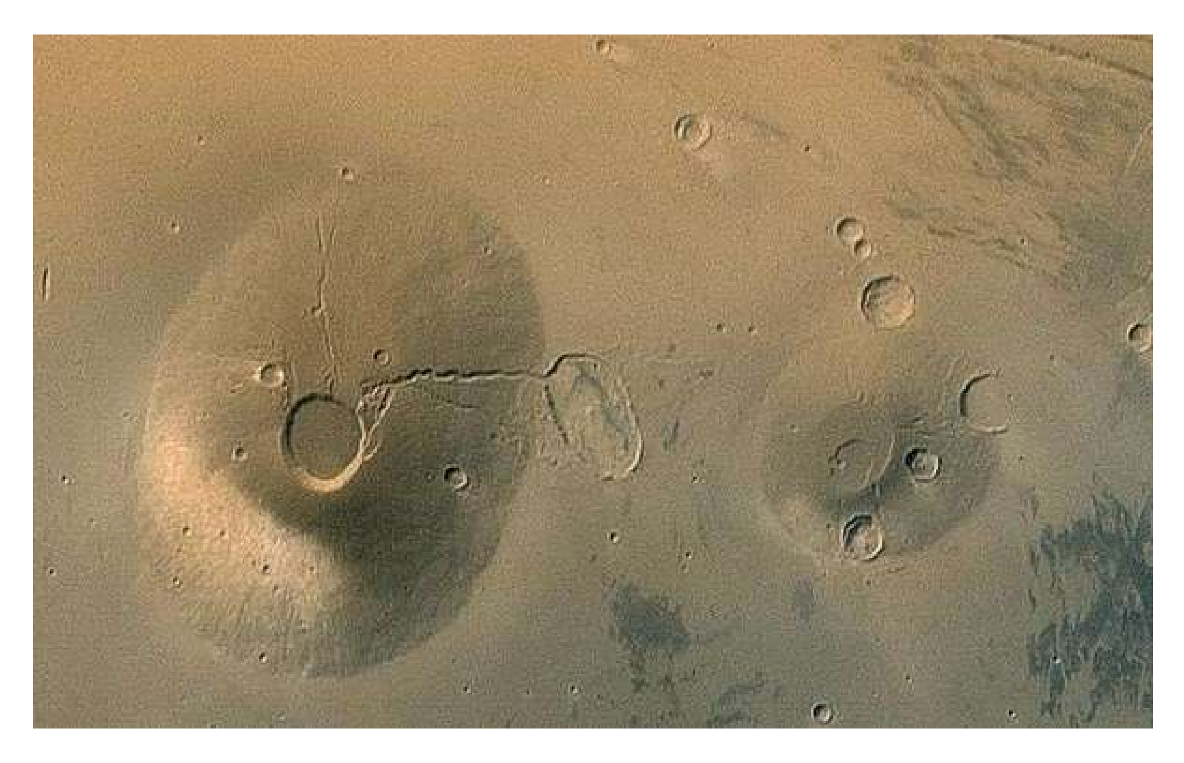
favorece el desarrollo de la Vida en cuanto a que es un protector frente a estas radiaciones ultravioleta. Por desgracia, también puede formarse mediante mecanismos abióticos, aunque en estos casos se produce en concentraciones muy bajas.

Aunque en la Tierra el *metano* primigenio apareció en los arrastres de las erupciones volcánicas, podemos decir que en casi su totalidad se generó y se genera como resultado de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. Al igual que el oxígeno, es un gas inestable que necesita ser repuesto continuamente, por lo que su presencia mantenida sólo puede explicarse por la existencia de las dos causas que hemos mencionado, biológicas o geológicas. La detección simultánea de oxígeno y metano en una exoplaneta sería un indicio a favor de la presencia de formas de Vida.

Ahora que sabemos lo que conviene buscar, hagámoslo para empezar en las cercanías. Puede que haya vida, o la haya habido, en nuestro sistema solar: Marte, los satélites saturninos Titán y Encélado, el joviano Europa, o incluso el más alejado Tritón, satélite de Neptuno… Andamos tras la pista del agua, la madre de la Vida, aunque después de lo dicho en el capítulo anterior, cuando hablamos de los organismos extremófilos, eso casi puede parecer irrelevante.

En la actualidad es bien conocido que **Marte** es un planeta “seco”. Tan solo se ha podido encontrar agua en estado sólido -en los casquetes polares constituidos por grandes masas de hielos perpetuos o en paredes de cráteres o valles profundos donde no incide nunca la luz solar- y se especula que en el subsuelo puedan darse las condiciones ambientales para que el agua se mantenga en estado líquido. Se han detectado grandes glaciares enterrados con extensiones de decenas de kilómetros y profundidades del orden de un kilómetro. Es evidente que hace millones de años por su superficie corría el agua líquida y que está claro que el hemisferio norte del planeta fue un gran océano. Eran otras las condiciones de su atmósfera y la presión que ejercía sobre la superficie.

La existencia de agua en Marte se ha podido corroborar gracias a la infinidad de fotografías de gran calidad obtenidas por las sofisticadas naves de la NASA y la ESA. En la imagen siguiente, por ejemplo, podemos ver al volcán marciano Ceraunius Tholus. Tiene 130 kilómetros de diámetro y su cima se eleva a 5,5 kilómetros sobre las llanuras adyacentes. Se observan claramente las antiguas torrenteras que peinan sus laderas e incluso lo que parece un cráter convertido en cuenca endorreica. Hablando de escorrentías es preciso comentar lo que parece ser la huella de flujos, estacionalmente activos, de disoluciones de sal muera que han sido anunciados en septiembre de 2015 por la NASA.[1] El hecho de que sean de sal muera es significativo ya que eso es lo que permite al agua mantenerse en estado líquido en el ambiente de baja presión y temperatura de la superficie de Marte.



El volcán marciano Ceraunius Tholus. A su lado el más pequeño (Wikimedia: NASA, dominio público)

Hay por tanto muchas y muy claras evidencias de agua en Marte, como hemos podido comprobar recientemente gracias a la sonda MRO de la NASA, y en donde hubo agua pudo haber Vida. Se

especula también con las trazas de gas metano que fueron detectadas [2] en la atmósfera de Marte en 2003, lo cual es considerado un misterio, ya que, bajo las condiciones atmosféricas del planeta y la radiación solar, el metano es inestable y tiende a desaparecer con el paso de los años, lo que permitiría hacer la hipótesis de que en Marte debe existir una fuente productora de metano que mantiene su concentración en la atmósfera y que produce un mínimo de 150 toneladas cada año… ¿se trata de bacterias metanógenas? Un año más tarde también la nave Mars Express de la ESA confirmó la existencia del metano atmosférico marciano (concentraciones de 10 ppb).[3] Sin embargo los datos obtenidos por el rover Curiosity de la NASA que está analizando en directo la superficie marciana sólo ha logrado confirmar una presencia residual de este gas, una sexta parte de los datos anteriores, lo que nos aleja la posibilidad de que represente la existencia de biometanógenos.[4] La controversia sigue servida.

Unos pocos kilómetros más allá, tan sólo 550 millones, orbita el gran Júpiter gaseoso, con su cohorte de satélites. Nos fijaremos en **Europa**, que tanto sorprendió a Galileo cuando enfocó por primera vez su telescopio hacia esta luna. Lo hizo el 7 de enero de 1610 y fue una demostración contundente de que no todos los astros giraban alrededor de la Tierra: por lo menos cuatro circunvalaban Júpiter. Europa es semejante en tamaño a nuestra Luna. Pero sus composiciones distan mucho de ser parecidas. La superficie de Europa es un casquete helado, de agua. A gran escala es una suave bola blanca, sorprendentemente lisa, sin apenas cráteres, lo que indica que su superficie se recicla con rapidez. Pero realmente está cruzada por infinitud de grietas. Más o menos anchas, con una configuración de bandas de colores que hace pensar en que estas grietas se abren de vez en cuando emergiendo por su parte central nuevo material: más agua que se hiela en las condiciones de temperatura de la superficie. Algo así como las dorsales oceánicas de la Tierra en versión H_2O. El tamaño de Júpiter induce unas tremendas mareas gravitacionales sobre la masa de Europa. Y así como en la localidad costera francesa de Mont Saint-Michel el mar

se eleva hasta unos catorce metros por acción de la fuerza gravitatoria del Sol y la Luna, la superficie del planeta jupiterino lo hace unos 30 metros ¡¡teniendo un radio tres veces menor que la Tierra!! Podemos imaginar la exorbitante energía de deformación liberada cada tres días y medio, que es lo que dura su periodo orbital. Todo indica que sobre el núcleo de hierro y sílice se encuentra un gran océano subterráneo de agua líquida de 100 kilómetros de espesor.

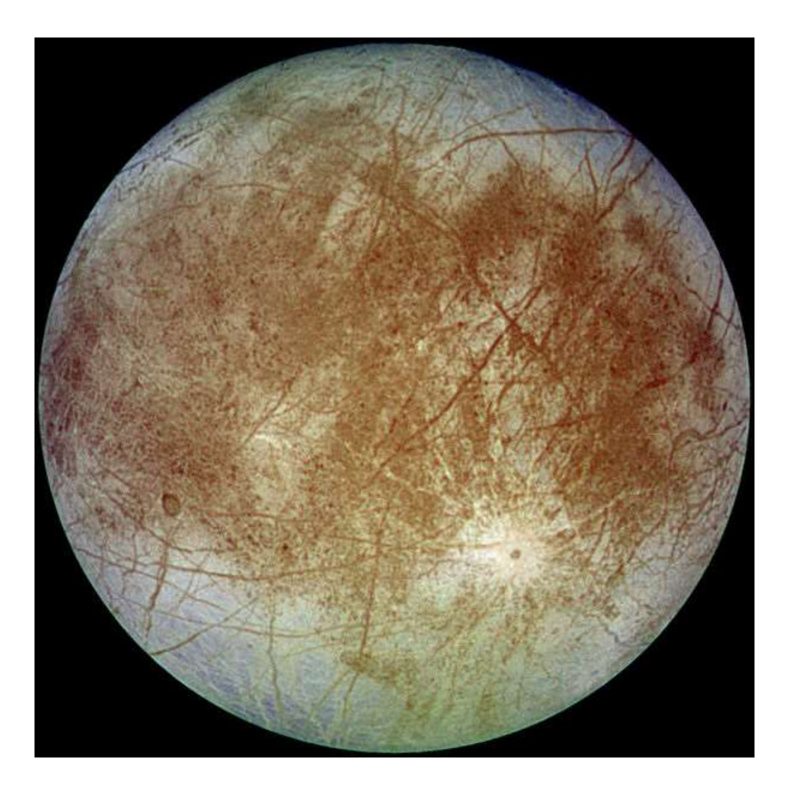
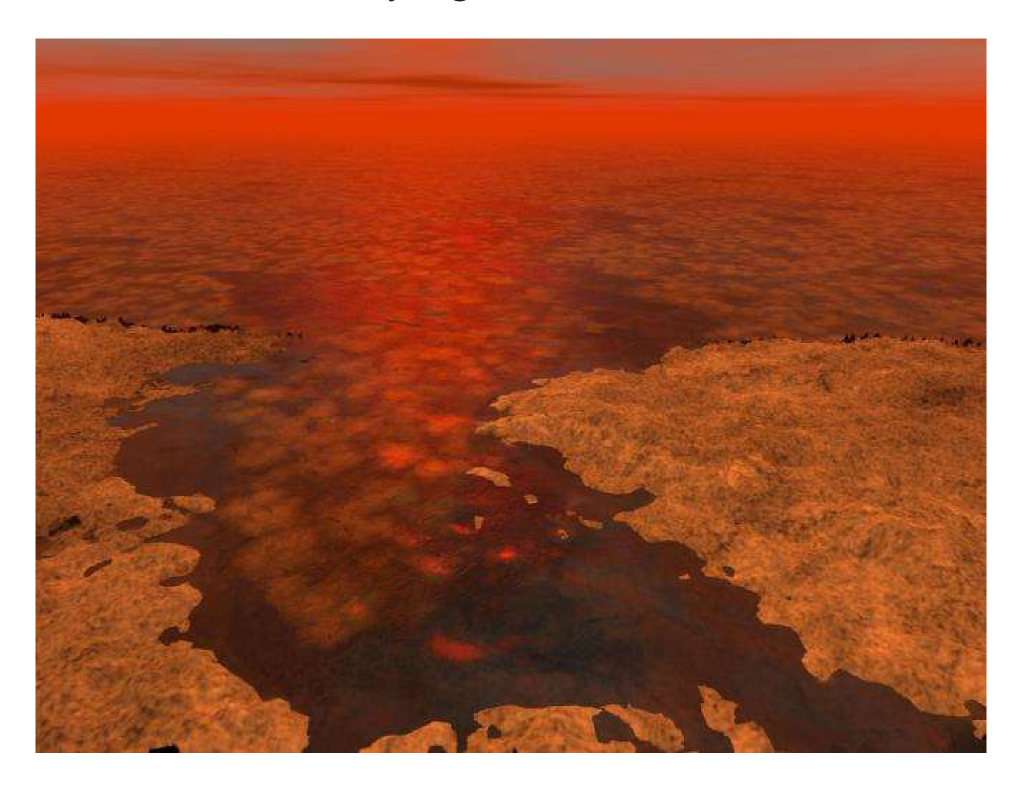


Imagen de la superficie de agua helada de Europa, luna de Júpiter (Wikimedia, NASA, dominio público)

Y toda esta digresión para llegar al agua líquida una vez más. El profesor Richard Greenberg de la Universidad de Arizona, en su libro "*Unmasking Europa*", ha estimado que Europa la tiene en suficiente cantidad y con una elevada concentración de oxígeno, incluso mayor que en nuestros mares.[5] Concentraciones semejantes serían suficientes para mantener no sólo microorganismos, sino también formas de vida más complejas. No parece un mundo raro para un extremófilo.

Titán es un caso extraño. Desconocido hasta que lo descubrió el astrónomo Christiaan Huygens en 1656, es el mayor de los satélites de Saturno, con un tamaño casi el doble del de la Luna. La rareza estriba en que su atmósfera es densa, es la única luna del sistema solar que la posee. Un 94% de nitrógeno y el resto hidrocarburos entre los que reina el metano. Las condiciones de frío y temperatura a tanta distancia del Sol, 1.400 millones de kilómetros, hace que el metano pueda permanecer normalmente en estado líquido. Allí realiza la función que el agua realiza en la Tierra: tiene su ciclo de evaporación, lluvia, escorrentías con degradación del suelo y almacenamiento en mares y lagos, con unas riberas heladas.



No es una foto sepia de un amanecer en las islas noruegas de Spitsbergen, es Titán en persona (Imagen: NASA/JPL-Caltech/USGS, fair use)

Su superficie de hielo está muy fragmentada y erosionada con volcanes de impacto, pero también otros que se creen que emiten hielo y amoniaco. En algunas zonas el hielo de la superficie parece estar recubierto de materia orgánica.

Este satélite posee también una densidad que hace presuponer que su masa está en gran medida constituida por hielo de agua. A la vista de ello se supone también que en sus profundidades puede encontrarse un mar de agua líquida y amoniaco sobre un fondo de roca. El escenario hace volar la imaginación a los astrobiólogos. Titán, con una superficie exterior repleta de compuestos de carbono, algunos de ellos en el camino de los materiales orgánicos para la vida, un mar de agua interior sobre un fondo rocoso en donde se pudiera repetir condiciones semejantes a las fumarolas submarinas terrestres. ¿Por qué no pensar en la vida?

Esta idea de vida en la saturnina luna Titán se ve reforzada después de que en 2014 se haya reportado la existencia de microorganismos viviendo en los lagos de asfalto -un líquido viscoso compuesto de hidrocarburos- de la isla de Trinidad, en el Caribe.[6]

Tenemos datos curiosos de esta luna obtenidos mediante la sonda Cassini, que la sobrevoló durante 2004, y de la sonda Huygens que aterrizó sobre su helada superficie en 2005. Se esperaba encontrar en las mediciones de su atmósfera un cierto porcentaje de hidrógeno, resultado de la disociación del acetileno y del metano provocada por los rayos ultravioleta en la atmósfera más exterior. Pero ni las concentraciones medidas de acetileno ni las del hidrógeno se correspondían a lo que debía ser un proceso químico independiente en un medio inerte, ni su difusión por la atmósfera se hacía de manera uniforme. Sorprendentemente, el H_2 disminuía a medida que se acerca a la superficie de Titán, como si allí se diera un proceso químico que lo consumiera.

No obstante, el desequilibrio de estos elementos se podría explicar mediante algún proceso inorgánico todavía desconocido que provocara la fijación del hidrógeno en la superficie y retirara el acetileno de forma selectiva. Pero los datos son también compatibles con la presencia en Titán de algún tipo de organismo vivo que viviera en el metano líquido, se alimentara de acetileno y consumiera

hidrógeno atmosférico: equivalente al agua, dióxido de carbono y oxígeno del esquema terrestre. De nuevo vuela la imaginación.

En la nómina de posibilidades se encuentra también **Encélado**, luna compañera de Titán. Al igual que en éste, el análisis de su gravedad [7] parece sugerir que posee un núcleo central rocoso y una capa externa de hielo. Y entre ambos, en posiciones próximas al polo sur, un mar subterráneo proyectando géiseres de hielo por las grietas. Gracias a los datos aportados por la sonda Casini acerca de los materiales eyectados en estas emisiones, se cree que en el fondo del mar subterráneo podría estar produciéndose una actividad hidrotermal. [8] Ya sabemos por el capítulo 05, "*La casa natal de la Vida*", la importancia de este tipo de procesos en la generación de vida en la Tierra. Completamos la imagen de Encélado diciendo que su atmósfera está compuesta prácticamente por agua.

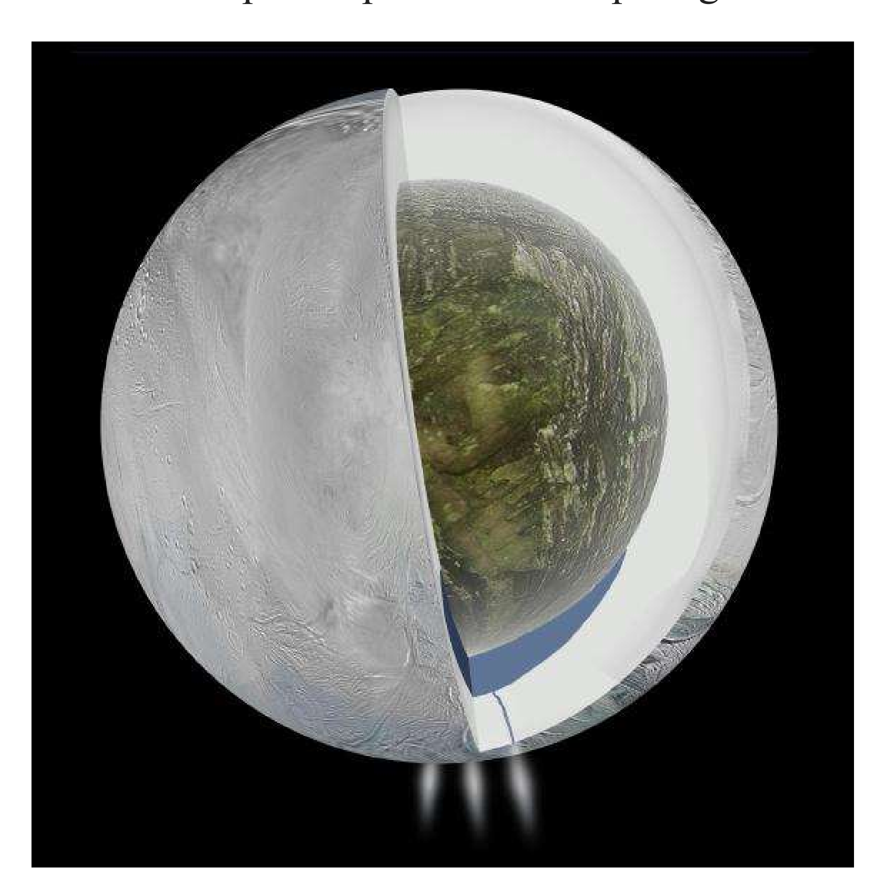
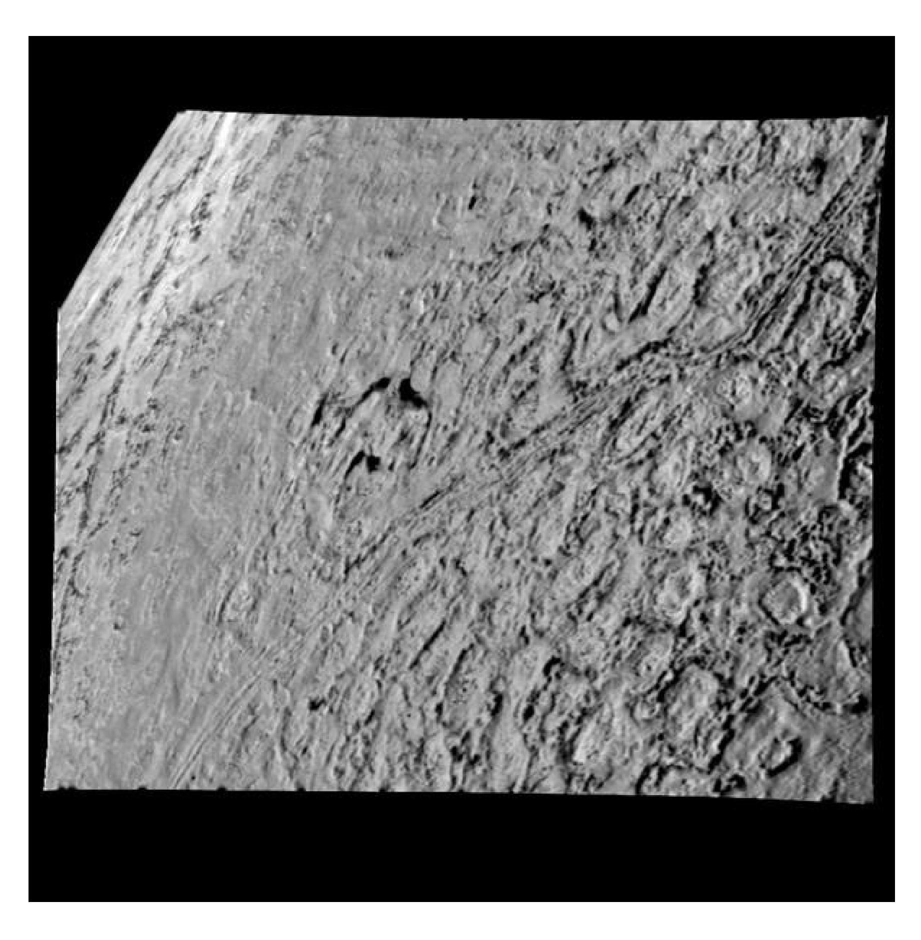


Diagrama que ilustra la constitución interna de Encélado con un núcleo rocoso y su mar interior de donde proceden los géiseres de

hielo situados en el polo sur (Imagen: NASA/JPL-Caltech/USGS, fair use)

Nos tenemos que ir ahora a 4.500 millones de kilómetros de la Tierra para encontrar a otro posible candidato a transportista sideral de vida: el satélite de Neptuno **Tritón**. La atmósfera es semejante a la de Titán, mucho nitrógeno aderezado con metano. Presenta una gran actividad geológica del tipo de criovulcanismo de nitrógeno líquido provocado por un diferente calentamiento zonal por parte del sol. Esta circunstancia, a pesar de que la temperatura en su superficie es congeladora, -235ºC, induce a pensar en un calentamiento interno, lo que nos permite imaginar de nuevo un mar subterráneo donde algún ser extremófilo lleve a cabo su actividad.



Vista parcial del hemisferio norte de Tritón (Imagen: NASA, fair use)

Con Tritón acabamos el breve repaso por los mejores candidatos de nuestro Sistema Solar a ser el soporte de desarrollo de algún tipo de vida. Como hemos podido ver, las mayores esperanzas las tenemos colocadas en el agua, tan imprescindible para la vida de la Tierra. Sí, el agua es una buena base de partida. Pero no tenemos mucho más. En algún caso algo que pudiera considerarse como biomarcador, el metano, pero muy, muy lejos de una evidencia seria o con posibilidad de ser contrastada. ¿Decepcionante? Yo no diría esto, aunque nuestra ávida curiosidad necesita realidades. Estamos comenzando y nuestra tecnología nos ha dado ya muchas alegrías. Pero hay que ir a estos mundos para comprobar "in situ" qué es lo que hay allí. ¿Será un sondeo en Marte? ¿Apostaremos todo a Europa y a que una sonda posada en su superficie conseguirá penetrar la capa de hielo hasta el océano subterráneo? Todo está abierto y nada cerrado.

La aventura en nuestro vecindario continúa. Quiero pensar, apoyado en todo lo que nos ha dicho la biografía de la Vida, que un extremófilo desconocido está allí esperándonos.

En el capítulo que sigue daremos un paseo por otro tipo de esfuerzos del hombre. Los que estamos haciendo para prolongar nuestras conjeturas más allá de nuestro sistema solar. Prolongar nuestras conjeturas y encontrar evidencias. Y si por estos lares la cosa está a medio cocer, imaginad lo crudo que está lo que vamos a ver, a pesar de los fantásticos avances de los últimos veinte años. Nos veremos en el mundo exterior.

NOTAS DEL CAPÍTULO 60:

1. Podéis ver esta noticia de la NASA (septiembre 2015) en este enlace

[http://www.lanasa.net/news/marte/la-nasa-confirma-la-evidencia-de-agua-liquida-en-marte/]

2. "*Methane on Mars: A Possible Biomarker?*". Ver esta publicación en la web de la NASA de abril de 2004.
3. Podéis encontrar la reseña de la noticia publicado en la web de la ESA en marzo de 2004. "*Mars Express confirms methane in the Martian atmosphere*".
4. Más información en este artículo, "*NASA Rover dims hopes for martian methane*", de National Geographyc de septiembre de 2013.
5. La reseña de la noticia, "*El océano de Europa contiene suficiente oxígeno para albergar vida*", proviene del periódico ABC, edición de octubre de 2009.
6. Una mayor información sobre los lagos de asfalto de Titán la encontraréis en esta publicación de la revista Science de agosto de 2014. "*Water droplets in oil are microhabitats for microbial life*", Rainer U. Meckenstock et al.
7. Más información en la publicación de la revista Science de abril de 2014. "*The Gravity Field and Interior Structure of Enceladus*", L. Iess et al.
8. "*Ongoing hydrothermal activities within Enceladus*", Hsiang-Wen Hsu et al. Noticia publicada en la revista Nature de marzo de 2015.

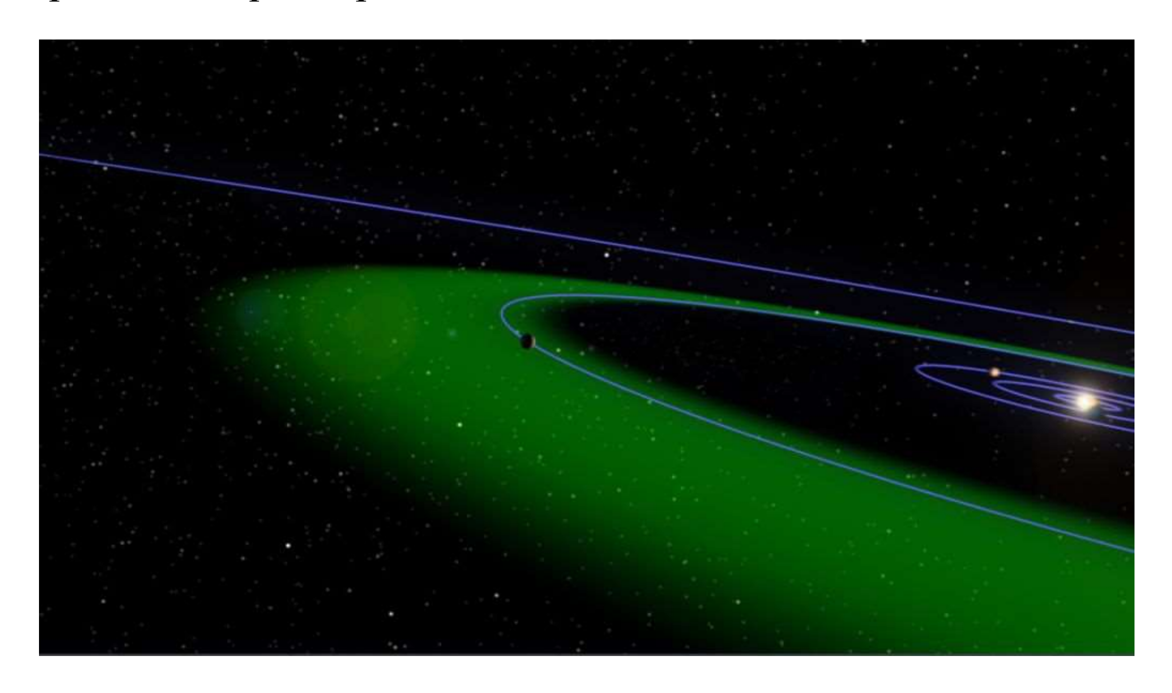
61. ¿Hay vida aún más lejos?

En los últimos capítulos nos hemos puesto a satisfacer una última curiosidad: ¿qué podemos decir de la Vida fuera de nuestro planeta? Hemos visto que, dada la inmensidad del Universo con todas sus estrellas y de lo sagaz que es la Vida para colonizar ámbitos extremos, cabía una cierta esperanza de que los organismos vivos de la Tierra estuviéramos acompañados en nuestro viaje. También hemo repasado nuestro entorno más cercano, dentro del Sistema Solar, por lo que hoy nos queda dar un nuevo paso y alejarnos a mucho más allá de cuatro años luz, que es donde ya se ve bien la primera estrella vecina, Alfa Centauri.

Demos por tanto un salto fuera de nuestro sistema planetario. Y sigamos teniendo en mente las inmensas posibilidades que nos ofrecen los extremófilos. El trabajo de la búsqueda pasa por encontrar planetas en sistemas estelares distintos al de nuestro Sol. Y los hemos encontrado, muchos, pero desgraciadamente en los que conocemos no tenemos claro que pudieran desarrollar una vida como la de la Tierra… a no ser que fuera alguno de los amantes de lo muy raro. Todo podría ser posible a lo largo de una investigación maratoniana que aún se encuentra muy en sus inicios. Y el escenario es abrumadoramente extenso: el Universo, al menos el que queda dentro de nuestro campo de visión, una estupenda esfera de 46 mil millones de años luz de radio -un año luz es poco más o menos 9,5 x 10^{12} kilómetros-.

Nos podemos preguntar cómo es posible, ya que si la edad del Big Bang es de 13.720 millones de años y la información viaja como mucho a la velocidad de la luz, ¿cómo nuestro horizonte de observación, donde se encuentran los más remotos confines desde

los que pudo venir la luz más primitiva, está a un radio de 46 mil millones de años luz? La explicación es bien sencilla cuando se sabe: no sólo se mueve la información, sino también el escenario. Sabemos que el tejido espacio-tiempo, el escenario donde todo discurre, ha estado en continua expansión. Por así decirlo la trama de hilos donde se apoya la luz en su recorrido se ha expandido, se ha hecho más abierta, produciendo la ilusión sorprendente de que la última luz del primer día ha viajado hasta nosotros casi un 65% más deprisa de lo que se postula como su velocidad máxima.



Representación artística de la órbita del exoplaneta 55 Cancri-f dentro de la zona de habitabilidad -cinturón verde- de su estrella 55 Cancri (Wikimedia, NASA, dominio público)

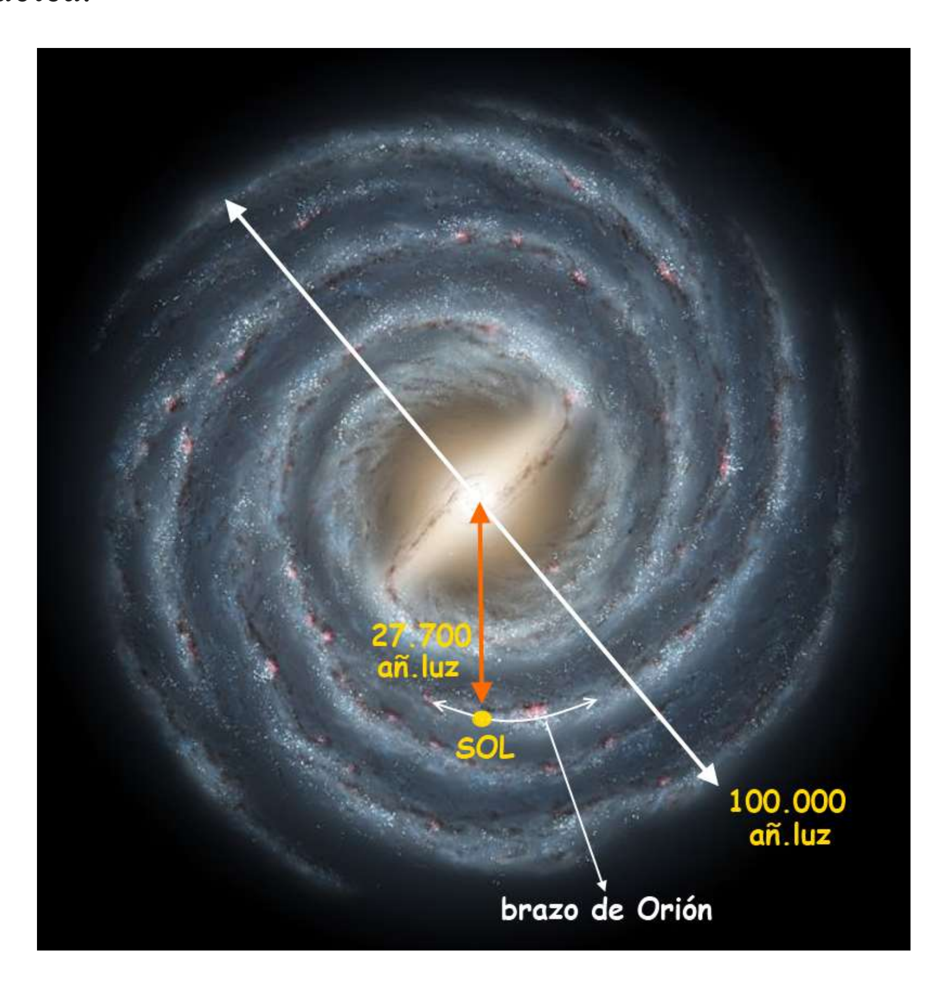
Ya he comentado en el capítulo 58 que ahí dentro de este inmenso globo cósmico creemos que arden 7 x 10^{22} estrellitas, y posiblemente la mayoría de ellas con planetas: hay donde buscar. La teoría más elemental de esta búsqueda se apoya en algo que se conoce como "Zona Goldilocks", zona de habitabilidad o la zona Ricitos de Oro. La guasa viene del cuento del mismo nombre, en el que la niña protagonista no encontraba la perfección en la solitaria casa de los ositos: la sopa de papá oso era demasiado fría, la de mamá oso demasiado caliente, la cama de uno muy dura y la de la otra muy

blanda… y así iba fijando en todo su *zona Goldilocks*, que así es como se llamaba tan exquisita niña. La zona perfecta, ni un poco más allá ni un poco más aquí. Como parece ser el capricho de la Vida: solamente medra en aquellas zonas del espacio que cumplen sus estrictas especificaciones.

La condición es que en esta zona privilegiada pueda mantenerse el agua en estado líquido. Se trata de un lugar del sistema planetario que no está ni muy cerca de la estrella, situación que favorece la evaporación del agua y su posterior barrido al espacio exterior, ni muy lejos, donde se congelaría y no serviría como diluyente universal para fabricar una "sopa primordial". En el Sistema Solar ese rango de distancias se localiza entre 0,99 unidades astronómicas (UA) [1] del Sol y 1,7 unidades astronómicas. Esto comprende las órbitas de la Tierra, a una distancia del Sol de 1,0 UA, y la de Marte, que se encuentra a un poco más de 1,5 UA del Sol. Con otro tipo de estrella, más joven o más vieja, más caliente o más fría, más grande o más pequeña, todo varía. Además, aunque encontremos en el universo astros que lucen bien bajo el prisma de la habitabilidad, hay que tener en cuenta que la *zona Goldilocks* no es inmutable. En principio la anchura de la franja habitable y su variable posición a lo largo del tiempo están condicionadas por la forma en como vaya evolucionando su sol siguiendo el normal camino de envejecimiento. Por lo tanto, la permanencia en la zona para un planeta puede tener fecha de caducidad, quizás antes de que la Vida haya tenido tiempo para formar sus procesos sobre él.

Evidentemente el ancho y posición de esta franja habrá que matizarlo además con el tipo de atmósfera del planeta y su tamaño, que impone la intensidad de la gravedad, y a partir de ambas la presión atmosférica, el posible efecto invernadero y el albedo superficial.[2] Puede que no se trate de un planeta rocoso o que su periodo orbital coincida con su día, es decir, dando siempre la misma cara, tórrida, hacia la estrella. Además, deberá encontrarse en una zona alejada del punto central de su galaxia o de regiones de intensa formación estelar, lugares ambos de alta emisión de radiación. Por

suerte, nuestro Sol queda suficientemente alejado del centro de la Vía Láctea.



Posición del Sol en la Vía Láctea (a partir de imagen NASA, fair use)

Y aún se nos pueden ocurrir otros condicionantes. Por ejemplo, que el planeta, a través de su tectónica [3] o proceso similar, permita un ciclo del carbono que mantenga el equilibrio de la concentración de CO_2 atmosférico -fijación en los fondos marinos versus emisión por los volcanes- en un punto en el que el efecto invernadero no sea un problema catastrófico. O imaginar una tal abundancia de elementos radioactivos en el manto que fuera suficiente como para incrementar la temperatura interior del cuerpo celeste y, en consecuencia, su habitabilidad en zonas frías fuera de la *Goldilocks*.[4] Incluso se puede pensar que aunque un planeta no sea viable en general, quizás alguna zona privilegiada suya sí lo sea.

Como la inmutable zona de tránsito entre la noche y el día en un planeta que siempre muestre el mismo hemisferio hacia su estrella por efecto de un acoplamiento de marea.[5] Y por aportar también algún aspecto negativo, podemos pensar en una atmósfera tan densa que la alta presión resultante impida la formación de agua líquida en la superficie del planeta "goldiloquiano".[6] La casuística es tan amplia como la imaginación.

Por todo ello resulta más fácil intentar cuantificar teóricamente los límites más allá de los cuales *no* puede desarrollarse la vida que decir dónde *sí* la hay. En este sentido hay una gran variedad de estudios al respecto que intentan acotar las condiciones de habitabilidad. Uno muy interesante, cuyas premisas son la viabilidad de un ciclo del carbono y la existencia de agua líquida sobre la superficie, realizado sobre modelos de planetas con una composición parecida a la de la Tierra y en un intervalo de masas de entre 1 y 10 veces la de nuestro planeta, concluye que sólo sería viable la habitabilidad en aquellos con radio máximo 1,7 veces el de la Tierra para pequeñas masas, y de 2,2 masas para los más pesados.[6] Otro estudio analiza el tamaño máximo que deberá tener un planeta situado en órbita alrededor de una estrella del tipo G, como el Sol, a 1 Unidad Astronómica, de forma que su gravedad no sea lo suficientemente grande como para mantener a lo largo del tiempo la densa atmósfera inicial de hidrógeno, cosa que haría la vida imposible. Concluye que, aunque en los primeros años de la vida de los planetas se formara dicha atmósfera, por debajo de masas equivalentes a 1,5 la de la Tierra el hidrógeno será barrido por los vientos solares.[7] Un tercer ejemplo lo encontramos en un estudio que determina que si una exoluna orbita a menos de diez veces el radio de su planeta no puede albergar vida.[8]

Con todo lo anterior quedan introducidas las condiciones más básicas para que un exoplaneta sea habitable. Ahora **vamos a buscarlos**. Pero ¿cómo?

La tecnología llega en nuestra ayuda. Tecnología que nos permite observar un punto luminoso en el espacio a grandísima distancia, tecnología que nos permite analizar la luz de este punto, tecnología con la que sabemos el movimiento de este punto luminoso hasta percibir cualquier anomalía en su deambular. Básicamente hay dos procedimientos de estudiar una estrella lejana con el objeto de saber si le ronda algún planeta. Uno, el *método de la velocidad radial*, que se basa en la interacción gravitatoria entre dos astros, particularizando en estrella y planeta, que altera su movimiento teórico por el espacio. Cada uno da tirones al otro de forma no uniforme en el tiempo, de tal manera que cualquier anomalía en sus velocidades es un claro indicador de que hay vecinos. Otra técnica es analizar los cambios en la luminosidad de la estrella lo que indicará que un objeto opaco y brillante -algún planeta- deambula entre ella y nosotros, que la vemos desde la Tierra: lo que llamamos el *método del tránsito*. Recientemente se está aplicando también otra metodología basada en el efecto de *lente gravitacional* que una estrella realiza sobre alguna galaxia de fondo. Este efecto sufrirá ligeras variaciones según sea la posición del planeta con relación al de su estrella.

Aunque la búsqueda de exoplanetas es relativamente reciente -ya que en 1988 se descubrió el primero, Gamma Cephei Ab-, hoy en día disponemos de una potente herramienta dedicada a ello. El 7 de marzo de 2009 se lanzó al espacio el telescopio Kepler. Está diseñado para captar y estudiar imágenes de planetas “similares” a la Tierra con el objeto de determinar si es posible la vida en ellos. Mide continuamente el brillo de 156.453 estrellas y, aplicando el método del tránsito, determina si en alguna de estas estrellas puede haber un planeta. Si se considera que el dato es suficientemente interesante, desde tierra otros observatorios, aplicando el método de la velocidad radial, acaban de afinar los resultados.

A partir de los resultados contrastados de Kepler, en noviembre de 2013 se publicó un estudio,[9] basado en un análisis estadísticos de los datos, que concluía que un 20% de las estrellas del tipo semejante

al Sol pueden tener planetas del tamaño de la Tierra. Dado que aproximadamente el 20% de las estrellas son de tipo solar, podemos concluir que tan sólo en la Vía Láctea podrían encontrase unos 4 mil millones de planetas parecidos al nuestro. Otra cosa es en qué posición "goldilock" se encuentran y cuáles son sus otras condiciones de habitabilidad. Y aún pudiendo ser favorables estas circunstancias, ello no quiere decir que necesariamente haya vida en ellos. La nómina de candidatos se verá realmente potenciada cuando seamos capaces de observar las exolunas que orbiten los exoplanetas gigantes, de los que ya conocemos un abundante número situados en la zona habitable de sus estrellas.

En febrero de 2014 la NASA proporcionó información de Kepler: En esta fecha el número de exoplanetas descubiertos y confirmados como tales era de 1.783.

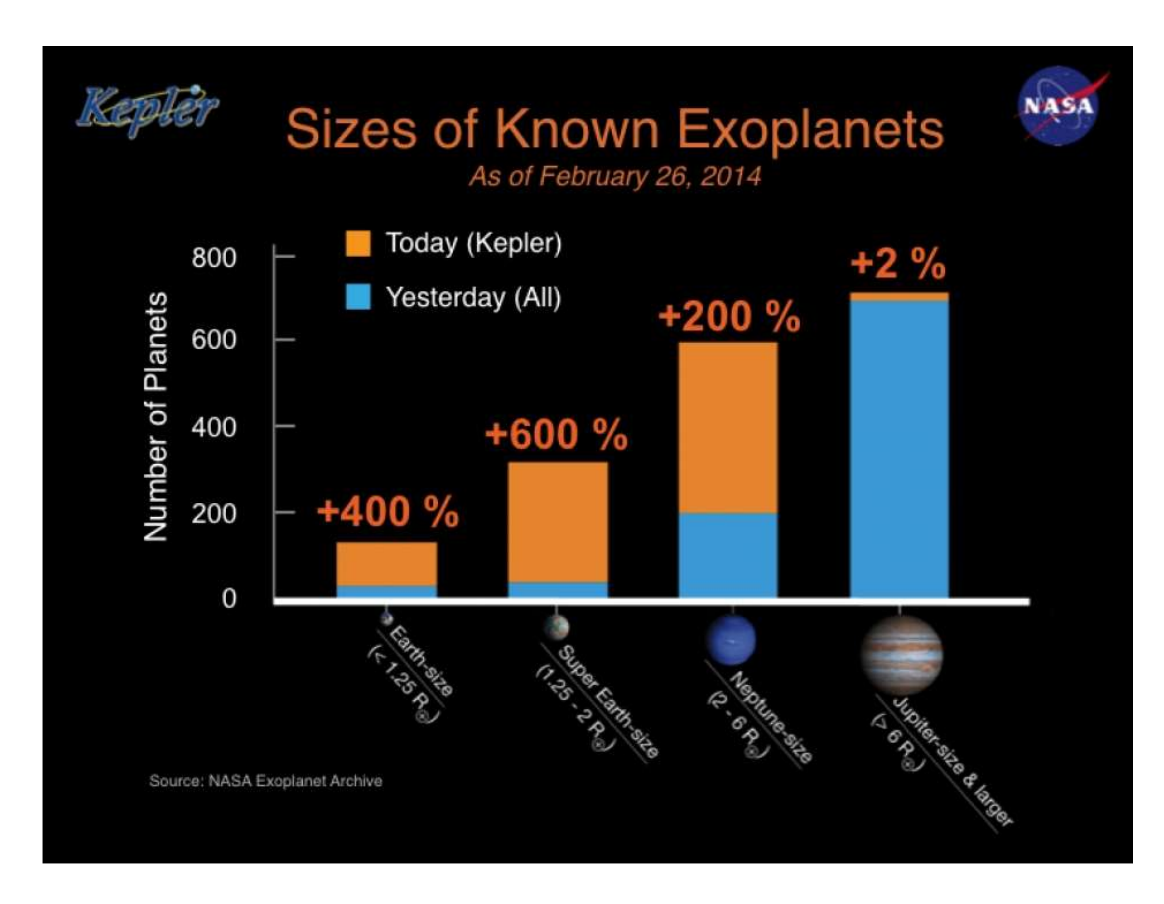
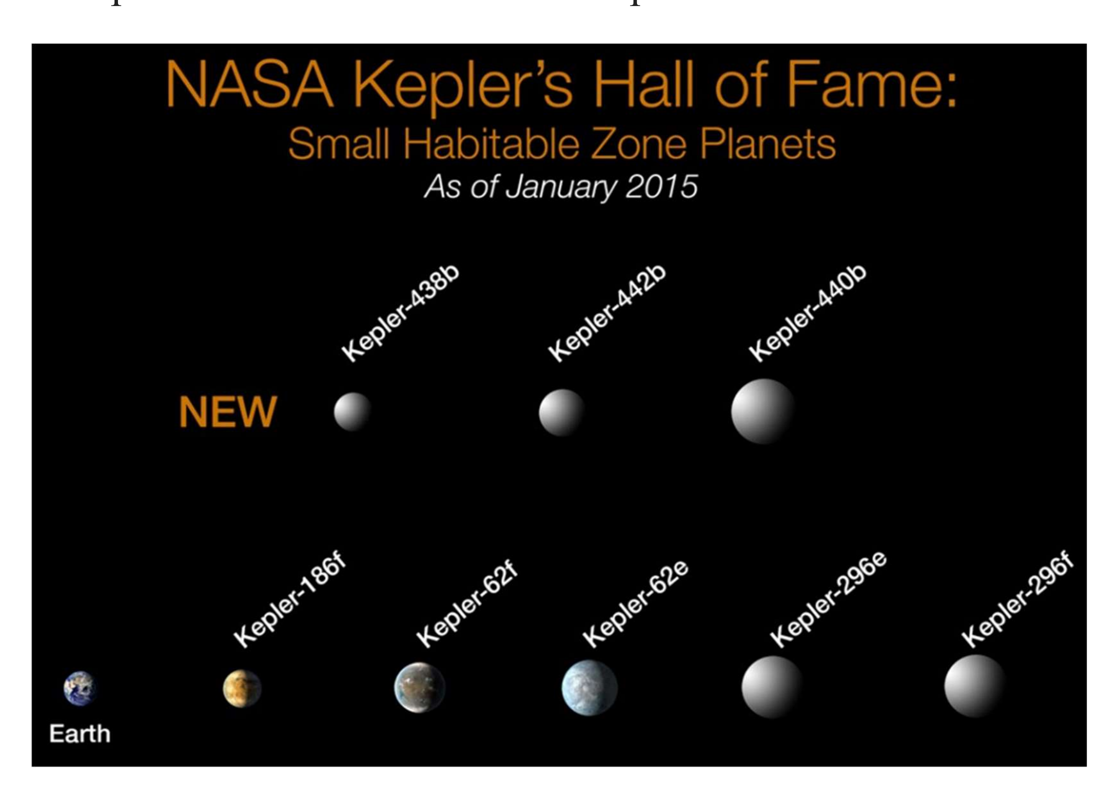


Diagrama resumen del número de planetas encontrados por Kepler, agrupados según su tamaño (Imagen: NASA, fair use)

Un 40% son gigantes gaseosos del tipo Júpiter que podrían acarrear una exoluna habitable, pero lo más importante es que una tercera parte son del tipo terrestre con un radio inferior al del doble del de la Tierra. Y de estos últimos, más de un 8% con tamaños muy similares ($R<1{,}25\ R_T$).

Kepler sigue trabajando, descubriendo y añadiendo nuevos exoplanetas a la nómina anterior. La NASA va actualizando casi diariamente su información,[10] de forma que a día 9 de febrero de 2017 reportaba la existencia de 3.449 planetas confirmados.



Nómina de los exoplanetas conocidos que cumplen la definición conservadora para ser habitables. Es muy probable que su composición sea rocosa y con la temperatura correcta para contener agua líquida. Esta figura, por la fecha en que se realizó, no recoge a Kepler 452-b, el que puede ser hermano gemelo de la Tierra y del que hablamos más al final de este capítulo (Crédito: NASA, Ames/W Stenzel, fair use)

En la siguiente imagen podemos ver una selección de objetos planetarios individuales a partir de datos de enero de 2015. Se

obtiene al aplicar a la lista total del telescopio Kepler el siguiente criterio conservador de selección, definido en el Catálogo de Exoplanetas Habitables de la Universidad de Puerto Rico, en Arecibo: "*Un exoplaneta potencialmente habitable es un planeta extrasolar con una masa entre 0,1 y 10,0 veces la de la Tierra y un radio desde 0,5 a 2,0 el de la Tierra, orbitando además en la zona habitable de su estrella*".[11]

El catálogo de la Universidad de Arecibo,[12] con datos de febrero de 2017, es ligeramente distinto al propuesto por la NASA y habla de hasta 15 planetas habitables de características "terráqueas".

Vamos ha extendernos un poco más acerca del pionero entre los anteriores. Nos estamos refiriendo al exoplaneta Kepler 186-f. En el mes de abril de 2014 el SETI y la NASA dieron a conocer[13] la existencia de lo que parecía ser el primer planeta de tamaño terrestre situado en la zona habitable de su estrella Kepler 186.

El sistema planetario de esta enana roja es casi tan antiguo como el Sistema Solar (más de 4 mil millones de años) y se encuentra en la constelación del Cisne a unos 492,3 años luz de nosotros. Su tamaño como estrella es aproximadamente la mitad del tamaño del Sol. Las enanas rojas son las estrellas más abundantes del Universo puesto que su conjunto agrupa aproximadamente las tres cuartas partes de todas las que existen.

La amabilidad con que este tipo de estrellas pueda recibir a la Vida es objeto de múltiples controversias y podéis obtener más información al respecto en este interesante artículo de Wikipedia.[14] Con objeto de agilizar la lectura al lector menos exigente, incluyo el primer párrafo del artículo mencionado, *traducido libremente* por mí mismo para facilitar su comprensión.

"*La habitabilidad en los sistemas de las enanas rojas viene determinada por un considerable número de factores y causas diversas. Algunos son negativos, como pueden ser el bajo flujo energético estelar, la alta probabilidad de que se produzca*

acoplamiento de mareas, los pequeños tamaños de sus zonas habitables circumestelares y las variadas fluctuaciones de brillo que experimenta la estrella. El gran número de ellas en el universo y su longevidad pueden ser factores positivos para la habitabilidad de sus planetas. El estudiar cómo afectan estas circunstancias unas a otras en el ámbito de la habitabilidad va a ayudar a determinar la frecuencia de vida extraterrestre y de la inteligencia en estos sistemas“.

Volvamos ahora a Kepler 186-f. Y demos unas pinceladas sobre lo que sabemos de este exoplaneta. Pocas cosas en concreto.

Su tamaño es un poco superior al de la Tierra ya que su radio es de 1,13 veces el de nuestro planeta. Se cree que, dado su pequeño tamaño, pueda ser un planeta rocoso o incluso cubierto en su totalidad por un océano. De su atmósfera se conoce muy poco.

Su movimiento orbital anual dura 130 días terrestres y lo hace a unos 0,4 UA de su estrella, el 40% de como lo hace la Tierra alrededor del Sol. También, dada la distancia a su estrella, se cree que las mareas gravitacionales le afectan poco. Precisamente por estas dos razones se supone que rota sobre su eje y con una velocidad más lenta que la de la Tierra, pudiendo durar el giro “diario” hasta semanas.

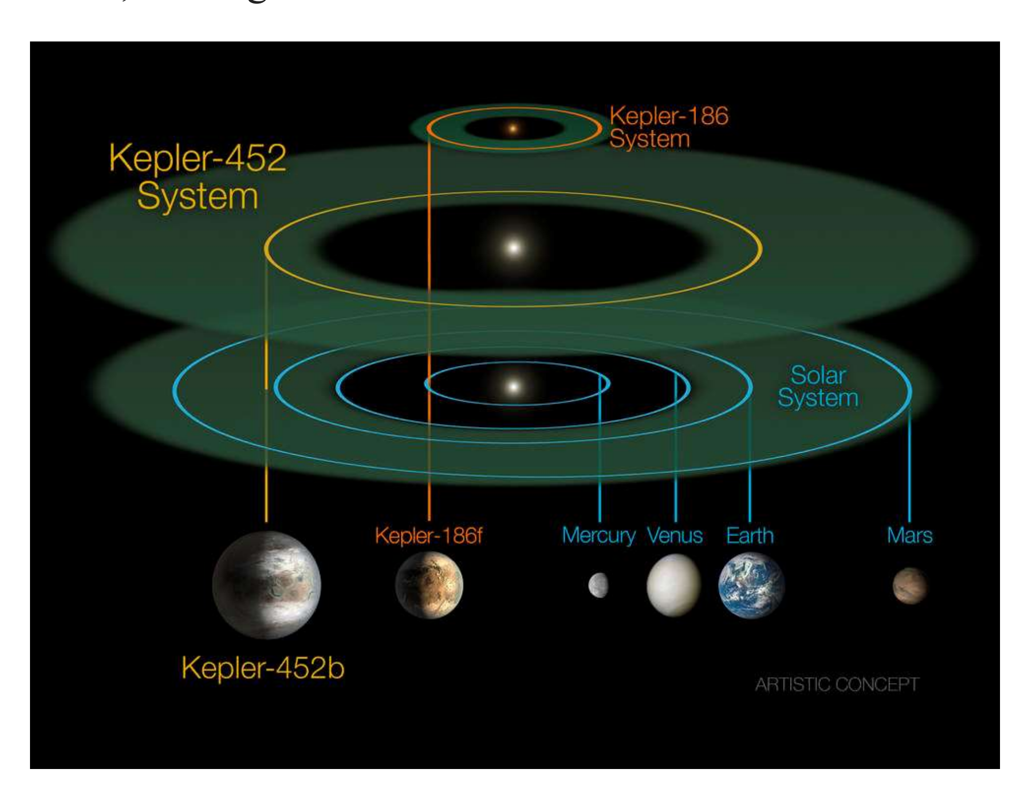
El hecho de que se encuentre más cerca de su estrella que la Tierra del Sol no quiere decir que su temperatura sea muy caliente. A pesar de que su estrella es fría (superficie a unos 3.700 K) comparada con el Sol (superficie a unos 6.000 K), recibe de ella una energía equivalente al 32% de la que recibe la Tierra del Sol. Por comparar, Marte recibe el 43%.

Kepler 186-f fue el pionero. Pero por ahora el diploma de “hermano gemelo” más parecido a la Tierra lo posee Kepler 452-b que se encuentra a unos 1.400 años luz. La NASA reportó en julio de 2015 el resultado de los análisis realizados sobre este planeta y su estrella.[15] De forma muy resumida se trata de un planeta rocoso

muy posiblemente con actividad volcánica, de un tamaño 60% superior al de la Tierra, un periodo orbital muy semejante -385 días- así como su radio -1,05 UA- que lo sitúa en plena zona habitable de su estrella. Y aquí está lo más interesante, esta última es muy semejante a nuestro Sol aunque unos mil millones de años más vieja.

En la siguiente imagen se hace una comparación entre las zonas habitables del Sol, de Kepler 186 y de Kepler 452. Como se podía esperar por el relativamente bajo flujo de energía que le llega de sus estrella, el planeta Kepler 186-f orbita muy próximo a la zona exterior de la franja habitable en su sistema, pero aún dentro del campo de posible existencia de agua en estado líquido. Y no puedo dudar que me resulta realmente excitante el ver el parecido del sistema planeta-estrella de Kepler 452-b con el de la Tierra-Sol.

Dicho esto, la imaginación es libre.



Comparación entre los sistemas Solar y los de Kepler 186 y Kepler 452 mostrando sus respectivas zonas de habitabilidad y los planetas que en ellas orbitan (Imagen: NASA, dominio público)

El último “notición” al respecto [16] lo ha dado la European Southern Observatory -ESO-.[17] Se ha descubierto a 39 años luz de nosotros ¡en el vecindario! una sistema planetario de una estrella enana roja fría -TRAPPIST-1- alrededor de la cual orbitan, posiblemente, hasta siete planetas, la mayoría del tamaño de la Tierra. Tres de ellos están el zona Goldilocks. El descubrimiento es extremadamente importante ya que, al estar tan “cerca” de la Tierra, es la primera vez que tenemos planetas con las condiciones apropiadas para estudiar sus atmósferas, si es que la tienen. Con un valor añadido al ánalisis de posibles biomarcadores: Es un sistema planetario accesible, con el que podremos avanzar en el conocimiento de la evolución de estos sistemas. Hasta ahora sólo teníamos al solar para echar una ojeada.

Bien. Hay que concluir que existen planetas en zonas con potencial para la Vida. Pero los indicios de vida son aún tan pobres que nos debemos preguntar de qué forma podemos afianzar esta etérea información. Deberíamos ser capaces de poder observar si realmente en estos astros hay indicios de biomarcadores de los que disertábamos en el capítulo anterior. Pero… ¡vamos a ver! Si casi no tenemos la suficiente tecnología para determinar si hay un exoplaneta y lo deducimos por procedimientos indirectos, ¿cómo voy a poder analizar el espectro de la luz que me llega del planeta? Porque su luz, llegar, llega, pero absolutamente enmascarada en la de su estrella.

¡Qué no se nos apodere la desesperanza! Con suma lentitud se está avanzando en el proyecto de nuevos telescopios con potencia suficiente como para observar exoplanetas, aunque lógicamente con ciertas limitaciones de resolución, y analizar el espectro de su luz. Uno de estos proyectos lo constituye el European Extremely Large Telescope (**E-ELT**). Se trata de un telescopio terrestre con un diámetro de 39 metros. Estará geográficamente situado en el desierto de Atacama, Chile. Otro gran proyecto en fase de desarrollo es el del James Webb Space Telescope (**JWST**), un observatorio espacial que estudiará el cielo en frecuencia infrarroja. Tendrá una gran resolución y su situación, más allá de la atmósfera de la Tierra, le

permitirá observar longitudes de onda infrarrojas vedadas para los instrumentos terrestres, por lo que será un buen complemento del E-ELT.

Un futuro esperanzador dentro de la amenaza de las penurias económicas que frenan a estos ilusionantes y necesarios proyectos.

Y hasta aquí lo que sabemos hacer en este campo. Sigue la búsqueda sin desfallecer, a la espera de nuevas ayudas tecnológicas que nos amplíen el campo de visión: toda la Vía Láctea, otras galaxias de nuestro cúmulo vecinal e incluso más allá, sabiendo que muchas de las estrellas que vemos posiblemente se apagaron hace mucho. Las posibles conclusiones pueden cambiar el sentir de la humanidad. Alguno de nuestros hijos podrá disfrutar de la certeza de que hay vida física más allá de la nuestra.

Y aquí, en este punto, se acaba nuestro viaje. Ahora sí.

Solamente queda un capítulo más de recopilación y despedida, con una bibliografía que espero os sea útil. Tanto como lo ha sido para mí.

NOTAS DEL CAPÍTULO 61:

1. La **unidad astronómica** es una unidad de longitud igual por definición a 149.597.870.700 metros, que equivale aproximadamente a la distancia media entre el planeta Tierra y el Sol.
2. El **albedo** es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la Tierra es del 37-39% de la radiación que proviene del Sol.

3. La **tectónica** es la especialidad de la geología que estudia las estructuras geológicas producidas por deformación de la corteza terrestre, las que las rocas adquieren después de haberse formado así como los procesos que las originan.
4. Este es un artículo que estudia la influencia de los materiales radiactivos en la zona de habitabilidad de su estrella. "*Thorium abundances in solar twins and analogues: implications for the habitability of extrasolar planetary systems*", Cayman T. Unterborn, abril 2015.
5. El **acoplamiento de marea** es la causa de que la cara de un objeto astronómico esté fijada apuntando a otro, tal como la cara visible de la Luna está siempre apuntando a la Tierra. Un objeto acoplado de esta forma toma para la rotación sobre su eje el mismo tiempo que para efectuar la traslación alrededor del compañero. Esta rotación síncrona hace que un hemisferio apunte de forma continua hacia el objeto compañero.
6. Encontraremos una mayor información en el mencionado estudio. "*On the radius of habitable planets*", Y. Alibert, publicado en Astronomy & Astrophysics de noviembre de 2013.
7. "*Origin and loss of nebula-captured hydrogen envelopes from 'sub'- to 'super-Earths' in the habitable zone of Sun-like stars*", H. Lammer et al., publicado en Monthly Notices of the Royal Astronomical Society de enero de 2014.
8. "*Exomoon habitability constrained by illumination and tidal heating*", René HellerI y Rory Barnes. Estudio que fue publicado en la revista Astrobiology de enero 2013.
9. "*Prevalence of Earth-size planets orbiting Sun-like stars*", Erik A. Petigura et al. Publicado por la revista PNAS de noviembre de 2013.
10. En este enlace de la web de la IPAC, del California Institute of Technology, se anuncian las nóminas de planetas posibles y confirmados.

    [http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html]

11. Todo este tipo de información la podéis encontrar en la web del Planetary Habitability Laboratory que enlazaréis aquí

[http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog/methods]

12. Podéis verlo en el siguiente enlace también del Planetary Habitability Laboratory.

[http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog]

13. "*An Earth-Sized planet in the habitablezZone of a cool star*", Elisa V. Quintana et al. Reportado en esta publicación de la revista Science de abril de 2014.

14. Este artículo de Wikipedia lo podéis leer en el siguiente enlace

[https://en.wikipedia.org/wiki/Habitability_of_red_dwarf_systems]

15. En la web de la NASA encontraréis el mencionado informe. "*NASA's Kepler mission discovers bigger, older cousin to Earth*", julio 2015.

16. Lo estoy escribiendo en febrero de 2017.

17. Con este comunicado de la European Southern Observatory, ESO, "*La enana ultrafría y los siete planetas*", a partir de un informe del equipo descubridor, "*Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1*", Michaël Gillon et al., que podéis enlazar aquí

[http://www.eso.org/public/archives/releases/sciencepapers/eso1706/eso1706a.pdf]

62. Últimas palabras

En el último capítulo de esta larga biografía de la Vida puse su punto final. Era el cierre de una larga experiencia que ha durado más de dos años y medio, a lo largo de los cuales no sólo he disfrutado trabajando con mis anotaciones y lecturas, preparando cada una de los capítulos de este libro, sino también, y de forma muy especial, con todos aquellos amigos con los que en el transcurrir del trabajo he cruzado comentarios y opiniones. En especial con los editores del blog "*El Cedazo*", J (Javier Sedano) y John Macluskey, donde todos estos más de un millón de caracteres se han ido publicando capítulo tras capítulo.



Así debió ser la masa madre de la Vida en nuestro planeta. Esta imagen corresponde a la nube molecular 1 de Tauro. (Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Con ellos y con todos vosotros, que habéis seguido con suma paciencia el deambular de unos sistemas químicos complejos que llamamos organismos vivos desde que eran tan sólo unos elementos

independientes de la tabla periódica pululando por la vecindad del Universo hasta el momento actual, en que contemplamos un desmelenado árbol de parentescos, realidades e historias acabadas.

La Vida apareció en nuestro planeta. La evolución la fue disfrazando de alternativas viables, entre ellas las de un organismo reflexivo. Un organismo que se ha empeñado no sólo en desentrañar su historia familiar, sino que también su curiosidad le está llevando, como hemos visto en los dos últimos capítulos, a buscar más allá de sus fronteras la confirmación de que no está sólo en el Universo.

La esperanza es un juego. Nos aferramos a ella pero las fuerzas del Cosmos nos superan. Dijimos que el Sol dará su zarpazo definitivo dentro de 5.000 millones de años: se acabó lo que se daba, al menos en la Tierra. Y, para acabar de reforzar el caos, por esa misma época nos estaremos enlazando con la galaxia de Andrómeda. Ahora está a 2,5 millones de años luz, pero cuando el Sol empiece con sus tórridas e infernales flatulencias de gigante roja, la Vía Láctea y Andrómeda entremezclarán sus tenues materias. O quizás la fiesta empiece antes. No va a ser un choque brutal, ya que el vacío interestelar de las galaxias es inimaginable. Pero lo que sí es cierto es que la gravedad impondrá su ritmo de baile. Tras un largo periodo de caos, de estirones y empujones, posiblemente hayan mezclado sus entretelas para formar una nueva y mayor galaxia espiral, después de haber expurgado muchas estrellas, con sus sistemas planetarios incluidos, lanzadas para siempre al infinito vacío del espacio o eternamente perdidas en el agujero negro que habitará su centro.

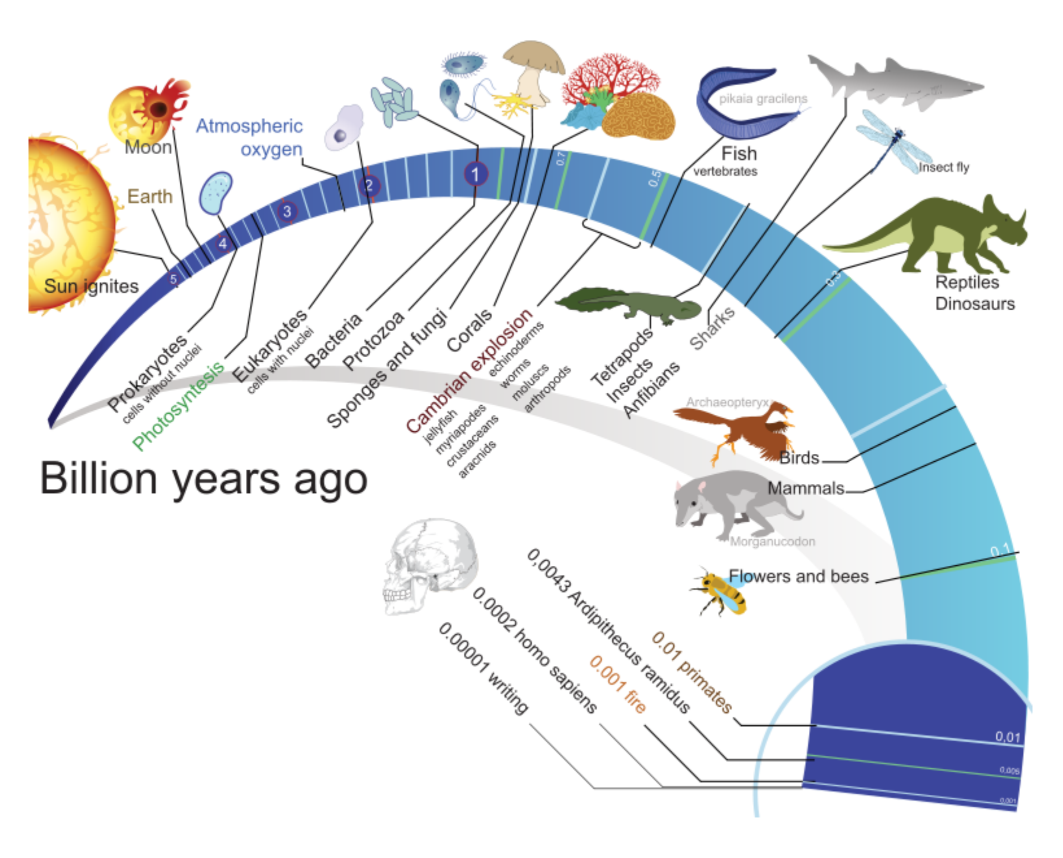
Mientras, el Universo seguirá su expansión iniciada con el Big Bang. La energía oscura -un misterioso 70% de lo que existe y que por ahora no sabemos lo que es- continuará con su eterna labor de abrir la trama del tejido espaciotemporal del Cosmos. Las galaxias más lejanas serán progresivamente transportadas sobre esta ola separadora hasta horizontes tan remotos que su luz ya no podrá llegar hasta nuestra Vía Láctea. A corta distancia, la gravedad frenará el efecto expansivo, pero será en vano, al final se habrán ido

todos nuestros vecinos y quedará solamente la gran Vía Láctea-Andrómeda rodeada de soledad. Poco a poco, ni eso, el cielo se convertirá en una cueva de negritud, se mire a donde se mire, si es que por entonces hay alguien que pueda mirar. No se percibirá nada. El Universo habrá difuminado su temperatura mientras va cumpliendo su expansión, hasta llegar a una uniforme y congelada distribución en donde será imposible generar ningún trabajo, ningún acto energético que ordene de nuevo algo asimilable al orden de la Vida. Ni siquiera organismos con metabolismos ralentizados a casi el mínimo. Y todo habrá acabado.

Esta es la teoría, como también es la teoría la que dice que puede que seamos un grano de arena más en una inmensa playa de distintos universos, cada uno con sus especificidades fruto de la forma que les dio la fluctuación cuántica materna. Con otros tipos de vida o vacíos. Igual algún ser inteligente habrá encontrado el camino para emigrar a otro espacio anexo al nuestro. De cualquier forma, nuestra aventura, la de la bacteria al hombre, pasando por los hongos y las plantas, fue bonita mientras duró.

Espero que el libro os haya interesado. No me atrevo a decir "fascinado", pues cada uno tenemos nuestro particular criterio. Pero ésa es la emoción que despierta en mí cuando amplío mi mirada consciente y racional sobre los infinitos de la Vida y el Cosmos. Eso sí, al menos deseo que hayáis disfrutado un montón con él, tanto como yo he disfrutado mientras lo escribía.

Y ahora sí, me despido de vosotros. Y lo hago con la misma imagen con la que empezó el libro. Ha sido un placer y… quizás nos veamos de nuevo.



La gran y excitante aventura: Desde el "encendido solar" hasta el cráneo del Homo sapiens (Wikipedia, dominio público)

ANEXO 1. Somera cronología de la Vida y la evolución

(Cronología aproximada en millones de años antes de hoy)

Cronología	Evento
4.570	Se inicia el sistema solar
4.400	Minerales más antiguos: circones
4.280	Rocas más antiguas: cinturón de Nuvvuagittuq, Candá
3.800	Formaciones rocosas más antiguas: Isua, Groenlandia
3.800 (? 4.100)	Se especula con indicios de vida en las rocas de Isua y en las de rocas de Nuvvuagittuq, Canadá (? circones de Jack Hills, Australia): células procariotas
3.800	Inicio del eón Arcaico
3.500	Posibles fósiles más antiguos en los estromatolitos de Warrawoona, Australia
3.500	Fotosíntesis anoxigénica
2.800 (? 3.460)	Comienza la fotosíntesis oxigénica
2.700	Estromatolitos con evidencias de cianobacterias
2.500	Comienza el eón Proterozoico
2.400	Evidencias de fósiles de bacterias en Pilbara, Australia
2.400	Fin de la Gran Oxidación
2.320	Cianobacterias oxigenadoras
2.300	Glaciación Huroniana
? 2.100	Fósil más antiguo eucariota ?
2.100	Fósil más antiguo pluricelular
? 2.100	Radiación de las plantas
2.000	Huellas del inicio de acumulación de oxígeno en la atmósfera
1.200	Fósil más antiguo con reproducción sexuada

Cronología	Evento
1.100	Inicio de la radiación de los hongos
850	Se inicia el despegue definitivo del oxígeno en la atmósfera
710	Glaciación general del planeta conocida como "*Tierra bola de nieve*"
? 700	Radiación del primer sistema muscular de tipo reticular.
? 700	Primer sistema nervioso de tipo reticular
637	Evidencias bioquímicas de esponjas
630	Radiación de la simetría bilateral
600	Fauna Ediacara
? 580	Primer sistema circulatorio en forma de cavidad gastrovascular con ramificaciones
570	Primeras evidencias fósiles de esponjas y cnidarios
570	Radiación de los celomados
550	Fósil más antiguo de un animal bilateral ¿*Kimberella*?
542	Inicio del Cámbrico
540	Explosión del Cámbrico
? 540	Inicio de la digestión extracelular y del aparato digestivo elemental
536	Fósil más antiguo de lobopodo. Primer artrópodo
525	Fósil de *Haikouella* primer cordado
? 525	Primeras branquias
505	Fósil de *Pikaia* primer vertebrado
500	Primeros dientes en el *Conodonta*
488	Inicio del Ordovícico
475	Fósil más antiguo de pez. Ostracodermo sin mandíbula.
470	Primeras esporas fósiles
470	Primeras plantas terrestres
460	Fósil más antiguo de hongo
450	Extinción masiva del Ordovícico
444	Inicio del Silúrico

Cronología	Evento
430	Primeros peces con esqueleto óseo
420	Fósil más antiguo de planta vascular
420	Fósil más antiguo de artrópodo terrestre
416	Aparecen los peces con mandíbula
416	Fin del Silúrico y comienzo del Devónico
410	Fósiles más antiguos de hexapodos
? 400	Aparición del cartílago como elemento estructural en los animales
390	Fósil más antiguo de pez con aletas lobuladas
380	Fósil más antiguo de arácnido
375	Primer vertebrado que sale del agua a tierra: *Tiktaalit*. Comienzan los tetrápodos
370	Fósiles más antiguos de plantas con semillas
364	Última extinción del Devónico
359	Inicio del Carbonífero
359	Los anfibios conquistan la tierra
319	Aparecen las plantas gimnospermas
320	Aparece el huevo amniótico
320	Fósil más antiguo de reptil
310	Primeros insectos voladores: aparecen las alas
299	Inicio del Pérmico
260	Aparecen los cinodontos, reptil mamiferoide ancestro de los mamíferos
260	Aparecen los reptiles *Archosauria*, ancestros entre otros de los dinosaurios, aves y cocodrilos
252	Extinción masiva del Pérmico-Triásico
251	Inicio del Triásico
250	Aparecen los dípteros
230	Aparecen los primeros dinosaurios
228	Conquista del vuelo por un gran reptil: el orden *Pterosauria*
200	Aparecen los reptiles lepidosaurios ancestros de los actuales reptiles con escamas

Cronología	Evento
200	Extinción del Jurásico-Triásico
200	Inicio del Jurásico
195	Aparecen los primeros mamíferos
163	Aparecen dinosaurios con plumas
160	Fósil más antiguo de mamífero placentario
150	Primer dinosaurio/ave volador: *Archaeopteryx*
145	Inicio del Cretácico
140	Primeros pólenes fósiles de angiospermas
140	Aparición de las flores
125	Fósil más antiguo de plantas angiospermas
125	Aparecen las aves: *Enatiornithes*
125	Fósil más antiguo de mamífero marsupial
100	Aparece la sociabilidad en los insectos
100	Fósil más antiguo de mamífero monotrema
65	Radiación de los *Neornithes*: pájaros modernos
65	Aparición de los primeros frutos carnosos
65	Extinción masiva del Cretácico-Terciario (K/T)
55	Recuperación y especiación de los mamíferos tras la crisis K/T
45	Algunos mamíferos retornan al agua: cetáceos
35	Primeros hielos sobre la Antártida
20	Inicios del Rift africano
18	Inicio de la familia de los hominoideos
10	Inicio de la familia de los hominidos
3	Cierre del istmo de Panamá
2,2	*Homo habilis*
1,8	Primeras salidas de *Homo* fuera de África

ANEXO 2. Bibliografía y fuentes de información

Libros y publicaciones, he leído unos cuantos, y siempre han llegado a mis manos de la manera más aleatoria e impensada, lecturas anteriores, referencias cogidas al hilo, simples casualidades.

En cuanto a mis fuentes de información, han sido variadas. No voy a negar que internet sea un pozo sin fondo, en el que hay que cosechar con mucho cuidado. Wikipedia me ha centrado muchas veces, tanto en su versión en castellano como en su versión inglesa, mucha más rica en la mayoría de las ocasiones. Mis blogs favoritos me han iluminado, motivado y entretenido. Suelen tener administradores serios, bien preparados y amenos, y son buenos divulgadores, ya que se les nota enamorados de lo que transmiten. Y transmiten cosas fundamentadas. Así que mi agradecimiento por la parte que les toca en mi "desborricamiento". Son especiales para mí mi blog padre más que hermano "*El Tamiz*" de Pedro Gómez-Esteban, así como la *"La pizarra de Yuri*" de Antonio Cantó. Y, cómo no, *"Naukas"* de Miguel Artime, Javier Peláez y Antonio Martínez, este último el alma mater de *"Fogonazos*". Dentro de la comunidad Naukas he encontrado grandes maestros, como Daniel Marín, César Tomé López, Juan Ignacio Pérez, Jesús Espí y muchos otros. *"Neofronteras"*, del enigmático doctor en físicas J.J., *"La ciencia y sus demonios"* de Manuel Carmona y otros, *"Materia"* de siete comprometidos con la ciencia comandados por Patricia Fernández de Lis, *"Este punto azul pálido"* de Daniel Torregrosa… y muchos más, como *"Arqueología Cognitiva"* de Ángel Rivera, *"Crónica de Arqueología"* del exhaustivo Iván Díaz, *"Reflexiones de un primate"* del gran antropólogo y humanista José María Bermúdez de Castro, *"Paleos"* de Christofer Taylor, los mapas geológicos *"Paleomap"* de Scotese o los de Ronald Blakey, dibujos y esquemas de autores anónimos o conocidos, de los que he aprendido y hecho uso, a veces adaptándolos a lo que me parece un mejor entendimiento, y siempre con la mejor referencia de sus

creadores que he podido encontrar. Y muchos más. Mi bibliografía particular sobre el tema ha ido creciendo apuntándome a cualquier referencia de calidad, que indudablemente me llevaba a una nueva publicación, amena o ardua, que me abría nuevos horizontes… hay tanto para leer que da vértigo. De todas formas, ahí va una lista, más que parcial y personal.

- Origen e historia de la Tierra: Francisco Anguita Virilla
- Amalur: del átomo a la mente: Juan Luis Arsuaga e Ignacio Martínez
- La especie elegida: Juan Luis Arsuaga e Ignacio Martínez
- El enigma de la esfinge: Juan Luis Arsuaga
- Fotosíntesis: Isaac Asimov
- La evolución del talento: José María Bermúdez de Castro
- Orígenes: El universo, la vida, los humanos: José María Bermúdez de Castro, Carlos Briones y Alberto Fernández
- Una breve historia de casi todo: Bill Bryson
- La cadera de Eva: José Enrique Campillo Álvarez
- Planeta humano: Eudald Carbonell y Robert Sala
- Cell evolution and Earth history: stasis and revolution: Thomas Cavalier- Smith
- Por qué la teoría de la evolución es verdadera: Jerry A. Coyne
- Y el cerebro creó al hombre: Antonio Damasio
- Teoría de la evolución: Charles Darwin
- El gen egoísta: Richard Dawkins
- El relojero ciego: Richard Dawkins
- El río del Edén: Richard Dawkins
- Escalando el monte improbable: Richard Dawkins
- Evolución: Richard Dawkins
- The ancestor’s tale: Richard Dawkins
- On the antiquity of language: the reinterpretation of Neandertal linguistic capacities and its consequences: Dan Dediu et al.
- Armas, gérmenes y acero: Pared Diamond
- Flora y vegetación durante el Jurásico y el Cretácico: Carmen Diéguez

- The origin of the Metazoa in the light of the Proterozoic fossil record: Mikhail A. Fedonkin
- Breve historia del hombre: Fernando Díez Martín
- Los orígenes de la vida: Freeman J. Dyson
- El registro paleobotánico y el tránsito Pérmico-Triásico: José Bienvenido Ferrer
- Life, an unauthorised biography: Richard Fortey
- The earth, an intimate history: Richard Fortey
- La conjura de los machos: Ambrosio García Leal
- El sexo de las lagartijas: Ambrosio García Leal
- Desde Darwin: Stephen Jay Gould
- La adaptación biológica: Stephen Jay Gould
- La vida maravillosa: Stephen Jay Gould
- De animales a dioses: Yuval Noah Harari
- Historia de un átomo: Lawrence Krauss
- Life ascending: Nick Lane
- Nuestros orígenes, en busca de lo que nos hace humanos: Richard Leakey y Roger Lewin
- Astrobiología: Bartolo Luque y otros
- Captando genomas: Lynn Margulis
- Cinco reinos, guía ilustrada de los phyla de la vida en la Tierra: Lynn Margulis y Karlene Schwartz
- Planeta simbiótico: Lynn Margulis
- On the origin of cells: William Martin y Michael J. Russell
- The major transitions in evolution: John Maynard Smith y Eörs Szathmáry
- Teoría de la evolución: John Maynard Smith
- Los primeros europeos: Mario Menéndez Fernández
- Beginnings of Cellular Life: Harold J. Morowitz
- Energy Flow in Biology: Harold J. Morowitz
- The emergence of everithing: Harold J. Morowitz
- El mono desnudo: Desmond Morris
- El origen de la vida: Aleksandr Ivánovich Oparin
- What is Life? How Chemistry Becomes Biology: Addy Pross

- Arqueología del lenguaje. La conducta simbólica en el Paleolítico: Ángel Rivera Arrizabalaga
- Arqueología cognitiva. Origen del simbolismo humano: Ángel Rivera Arrizabalaga
- The universe within. A scientific adventure: Neil Shubin
- Your inner fish: Neil Shubin
- Human Physiology: Dee Unglaub Silverthorn
- The resilient earth: Allen Simmons y Doug L. Hoffman
- La maldición de Adán: Bryan Sykes
- Las siete hijas de Eva: Bryan Sykes
- The variety of life: Colin Tudge
- Historia del clima de la Tierra: Antón Uriarte
- Evolución amniota y la evolución de los vertebrados: Maricela Villagrán Santa Cruz
- Primates y Filósofos: La Evolución de la Moral del Simio al Hombre: Franz de Waal
- Eukaryotes and multicells. Origin: Ben Waggoner
- El enigma de los dinosaurios: J N. Wilford